

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



ESCUELA DE DOCTORADO DE LA UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
DOCTORADO EN INGENIERÍA CIVIL

TESIS DOCTORAL

EFFECTO DEL CLORURO SÓDICO EN LAS PROPIEDADES
MECÁNICAS, MÓDULOS, CICLOS HIELO-DESHIELO Y
DURABILIDAD DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS

PhD THESIS

THE EFFECT OF SODIUM CHLORIDE ON THE MECHANICAL
PROPERTIES, MODULUS, FREEZE-THAW CYCLES AND
DURABILITY OF BITUMINOUS MIXTURES

Presentada por: **LUIS JULI GÁNDARA**

Dirigida por: **Dr. ÁNGEL VEGA ZAMANILLO**
Dr. MIGUEL ÁNGEL CALZADA PÉREZ

Santander 2020

*A mis equipos,
gracias por apoyarme y ayudarme a llegar.*

*Oh oh come take my hand
We are riding out tonight to case the promised land
Oh oh Thunder Road, oh Thunder Road, oh Thunder Road.
Bruce Springsteen*

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por el apoyo constante que me han aportado y me aportan, en todos los proyectos que emprendo. Gracias por la educación que he recibido desde pequeño... hasta no ser tan pequeño. Muchas gracias por estar siempre conmigo.

A Ángel Vega Zamanillo, que me dio la oportunidad, hace ya unos cuantos años, de embarcarme en este apasionante mundo de la investigación a cerca de las mezclas bituminosas. Desde aquel proyecto fin de carrera hasta esta tesis y quién sabe hasta dónde más... Muchas gracias por tu tiempo y paciencia.

A Miguel Ángel Calzada, que siempre ha aportado su experiencia, punto de vista e ideas a lo largo de este camino. Gracias por ayudarme cuando lo he necesitado.

A Miguel Gómez Beares, por hacerme sentir parte de la familia. Por todas esas horas en el laboratorio (y en la cancha) aprendiendo. Aprendiendo a ayudar, a hacer las cosas bien, a saber lo que cuesta hacer una probeta y a mil cosas más. Muchas gracias, amigo.

A Jorge Rodríguez Hernández y a Daniel Castro Fresno, por su apoyo y ayuda cuando os he necesitado. Gracias por las oportunidades que me habéis dado.

A mis compañeros de GITECO, especialmente a Javier, Israel, José Luis y Jaime por esos corrillos que hicieron que los momentos de trabajo duro lo fueran un poco menos.

A Richard Laxalt, por ayudarme hasta mucho más allá de lo que jamás hubiera imaginado. Thank you!

A los laboratorios de Materiales, Sanitaria y Geotecnia de la Universidad de Cantabria. A todos mis compañeros de dichos departamentos que me han ayudado y facilitado, siempre con la mejor predisposición, la realización de este proyecto.

Al Museo Marítimo del Cantábrico, por su colaboración en la obtención del agua marina.

A la Autoridad Portuaria de Santander, en especial a Cristina, Alberto y Juan por facilitarme en todo momento compatibilizar el trabajo con la realización de esta tesis.

Por último, y desde luego no por ser menos importante, a Soraya Armada Breijo. Por apoyarme, animarme; por tener infinita paciencia y por darme todo el cariño del mundo. Muchas gracias por estar siempre conmigo.

RESUMEN

Esta Tesis Doctoral es un compendio de tres artículos que presentan la influencia que tiene la sal (NaCl) en las mezclas bituminosas. Para ello se evalúan distintos tipos de mezcla bituminosa (AC-16 Surf D y PA-16) que se disponen comúnmente en capas de rodadura de carreteras que pueden estar influenciadas por la sal; tres tipos de afección de la sal a la mezcla y tres interacciones de la temperatura con la mezcla.

El primer artículo tuvo como objetivo conocer la variación de las propiedades mecánicas tales como, la adhesividad árido-ligante, la resistencia mecánica, el *ravelling* y las deformaciones plásticas. Para llevarlo a cabo, se evaluaron tres tipos de mezcla bituminosa: una mezcla cerrada con un betún convencional y dos mezclas porosas, una con betún convencional y otra con un betún modificado. El efecto de la sal fue analizado de tres maneras distintas: sumergiendo probetas de mezcla bituminosa en agua con diferentes concentraciones de sal, añadiendo sal a la mezcla como si se tratase de árido y sumergiendo el árido en agua con diversas concentraciones de sal antes de fabricar la mezcla bituminosa con ello. El comportamiento mecánico de la mezcla fue analizado mediante los ensayos de resistencia a la tracción indirecta (ITS), sensibilidad al agua (ITSR), ensayo de rodadura y ensayo cántabro. (DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.05.002)

Debido a que las mezclas bituminosas tienen un comportamiento viscoelástico-plástico, conocer estas propiedades es importante. El segundo artículo definió estas propiedades de la mezcla bituminosa cuando se ve afectada por los tres mismos métodos de influencia de la sal a través de los valores del módulo resiliente, el módulo dinámico y la fatiga. (DOI: 10.3390/ma13092126)

Una de las principales aplicaciones que tiene la sal en ingeniería civil es su uso como agente de deshielo en zonas con bajas temperaturas. Por otra parte el agua salada puede dañar las carreteras en zonas costeras y portuarias. El tercer artículo determinó el comportamiento de una mezcla bituminosa cerrada cuando está sometida a ciclos de hielo-deshielo y a cambios de temperatura extendidos a lo largo del tiempo. Estas interacciones térmicas se realizaron para probetas secas, sumergidas en agua destilada y sumergidas en agua salada (NaCl). El comportamiento de la mezcla bituminosa fue determinado a través de los ensayos ITS, ITSR, ensayo de pista, módulo dinámico y fatiga. (DOI: 10.3390/app10041241)

ABSTRACT

This doctoral thesis is a compilation of three articles focusing on the influence of salt (NaCl) on bituminous mixtures. In order to achieve this, different types of mixtures (AC-16 Surf D and PA-16), which are frequently used on surface pavements that can be influenced by salt, were evaluated; three salt treatments and three temperature interactions with the bituminous mixtures.

The target of the first article was to find out the variation in the mechanical properties of mixtures such as aggregate-binder adhesiveness, mechanical strength, ravelling and plastic deformation. To do this, three types of bituminous mixtures were evaluated: a hot mix asphalt with conventional bitumen; and two porous mixtures, one manufactured with conventional binder and another with modified binder. The effect of the salt was analysed using three different methods: immersing the mixture in water with different concentrations of salt; adding salt as aggregate into the mixture; and submerging the aggregate in water with a certain concentration of salt, drying it and then manufacturing the bituminous mixture with it. The mechanical performance of the mixture was determined by the Indirect Tensile Strength Test (ITS), Water Sensibility Test (ITSR), Wheel Tracking Test and Cantabro Loss Particle Test. (DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.05.002)

Due to the bituminous mixtures having viscoelasticplastic behavior, to know these properties plays a decisive role in characterizing these materials. The purpose of the second article was to discover these properties through the results of the Resilient Modulus Test, Dynamic Modulus Test and Fatigue Life Test when bituminous mixtures were influenced by the same three interactions of salt. (DOI: 10.3390/ma13092126)

One of the main applications of salt in civil engineering is its use as a de-icing agent on roads in cold regions. Moreover, salt water can damage roads in coastal and port locations. The target of the third article was to find out the behavior of an asphalt concrete when it was subjected to temperature changes and freeze-thaw cycles. These temperature interactions were carried out for dry specimens, specimens submerged in distilled water and specimens submerged in salt water (NaCl). The behavior of the mixture was determined by the ITS, ITSR, Wheel Tracking Test, Dynamic Modulus Test and Fatigue Life Test. (DOI: 10.3390/app10041241)

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. MARCO.....	3
1.2. OBJETIVOS.....	6
1.3. ARTÍCULOS PUBLICADOS Y ORGANIZACIÓN	7
CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE.....	9
2.1. INFLUENCIA DE LA SAL EN LAS CARRETERAS.....	11
2.1.1. La sal como compuesto químico	11
2.1.2. Vialidad invernal.....	12
2.1.2.1. Fundentes	13
2.1.2.2. Aditivos anticongelación.....	26
2.1.3. Sal en climas cálidos y climas costeros	29
2.2. MEZCLAS BITUMINOSAS.....	31
2.2.1. Propiedades de las mezclas bituminosas.....	31
2.2.2. Ciclos de hielo-deshielo en las mezclas bituminosas.....	33
2.2.3. Patologías de las mezclas bituminosas	37
2.2.3.1. Deformaciones.....	38
2.2.3.2. Roturas.....	39
2.2.3.3. Desprendimientos.....	40
CAPÍTULO 3: MATERIALES	43
3.1. ÁRIDOS.....	45
3.1.1. Árido grueso	46
3.1.2. Árido fino	48
3.1.3. Polvo mineral (filler).....	49
3.2. LIGANTES HIDROCARBONADOS.....	50
3.3. SAL.....	52
3.4. AGUA DESTILADA.....	53
3.5. AGUA DE MAR.....	54
3.6. DISEÑO DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS	55
3.6.1. AC – 16 Surf D	55
3.6.2. PA – 16.....	58
CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA	61
4.1. TRATAMIENTOS DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS CON LA SAL.....	63
4.1.1. Muestras sumergidas en agua salada	63
4.1.2. Sal añadida a la mezcla como árido.....	64
4.1.3. Árido saturado en agua con sal antes de emplearlo en la mezcla.....	66

4.2. INTERACCIÓN DE LA TEMPERATURA EN LAS MEZCLAS BITUMINOSAS	69
4.2.1. Temperatura constante	69
4.2.2. Ciclos de hielo-deshielo	69
4.2.3. Un año a la intemperie	74
4.3. ENSAYOS.....	76
4.3.1. Densidad aparente y volumen de huecos.....	76
4.3.2. Resistencia a la tracción indirecta y sensibilidad al agua	79
4.3.3. Ensayo de rodadura	83
4.3.4. Ensayo cántabro (pérdida de partículas en mezclas porosas).....	87
4.3.5. Módulo resiliente	89
4.3.6. Módulo dinámico	95
4.3.7. Ensayo de fatiga.....	99
4.4. SÍNTESIS DE METODOLOGÍA.....	102
4.4.1. AC – 16 Surf D.....	102
4.4.2. PA – 16.....	105
CAPÍTULO 5: ARTÍCULOS PUBLICADOS	109
5.1. ARTÍCULO 1	111
5.2. ARTÍCULO 2	119
5.3. ARTÍCULO 3	133
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES.....	147
6.1. CONCLUSIONES GENERALES	149
6.2. CONCLUSIONES ARTÍCULO 1	150
6.3. CONCLUSIONES ARTÍCULO 2	151
6.4. CONCLUSIONES ARTÍCULO 3	152
CAPÍTULO 7: FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	153
CAPÍTULO 8: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	157

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sal.....	3
Figura 2. Extensión de sal en una calle y camión esparciendo sal para evitar la formación de hielo.	4
Figura 3. Área portuaria pavimentada con mezcla bituminosa.	4
Figura 4. Daño causado en el pavimento.....	5
Figura 5. Enlace de cloruro sódico.....	11
Figura 6. Red cristalina del cloruro sódico (NaCl).....	11
Figura 7. Esquema de comportamiento de la sal en el agua.....	12
Figura 8. Diagrama de estado del cloruro sódico.....	14
Figura 9. Tiempo de acción de NaCl y CaCl ₂ en función de la temperatura.....	15
Figura 10. Temperatura eutéctica y de trabajo de distintos fundentes.....	15
Figura 11. Proceso de descongelación del hielo debido a la sal en el pavimento.....	16
Figura 12. Precio por tonelada de los principales fundentes existentes.....	18
Figura 13. Consumo de fundentes por Demarcaciones en España en la campaña 2009/2010.....	19
Figura 14. Modelo de escorrentía e infiltración en el entorno de una carretera.....	20
Figura 15. Programa informático para determinar la dotación de sal necesaria.....	21
Figura 16. Operarios realizando una medida con SOBO-20 en la A-2 en Madrid.....	22
Figura 17. Hielo con agua destilada y hielo con agua con sal.....	22
Figura 18. Efecto de distintos tipos de agentes de deshielo sobre el pulimentado de las mezclas bituminosas.....	23
Figura 19. Determinación de la concentración de fundente que produce un daño crítico.....	24
Figura 20. Fisura en probeta sumergida en solución salina.....	25
Figura 21. Comparación del proceso de congelación de muestras sin (N) y con (F) filler anticongelante.....	26
Figura 22. Filler anticongelante V-260.....	27

Figura 23. Esquema de funcionamiento del aditivo antihielo.	28
Figura 24. Resultados de sensibilidad al agua con diferentes finuras de filler anticongelante.	28
Figura 25. Mapa del mundo que muestra las zonas climáticas y los lugares donde se ha informado de daños de la sal en carreteras y pistas de aterrizaje.....	29
Figura 26. Ductilidad de distintos tipos de betún en función de la cantidad de sal añadida.	30
Figura 27. Muestras sometidas a ciclos de hielo-deshielo.	33
Figura 28. Huecos de una capa de rodadura en función de los ciclos de hielo-deshielo.	34
Figura 29. Estabilidad Marshall en función del número de ciclos de hielo-deshielo.....	35
Figura 30. Disminución de la rigidez con el número de ciclos de hielo-deshielo.	35
Figura 31. Sensibilidad al agua en función de los ciclos de hielo-deshielo.....	36
Figura 32. Resultados de profundidad de huella antes y después de 50 ciclos de hielo-deshielo.	37
Figura 33. Esquema deformaciones por hinchamiento.	38
Figura 34. Hinchamiento.....	39
Figura 35. Esquema grieta transversal.....	40
Figura 36. Descarnadura.....	41
Figura 37. Esquema desprendimientos.	41
Figura 38. Tamizadora pequeña para la obtención de los tamaños menores.....	45
Figura 39. Lavado del árido.....	45
Figura 40. Árido grueso ofítico dividido en fracciones.....	46
Figura 41. Árido fino ofítico dividido en fracciones.....	48
Figura 42. Polvo mineral calizo.	49
Figura 43. Betún 50/70 a 150 °C.	50
Figura 44. Cloruro sódico (NaCl).	52
Figura 45. Granulometría de la sal empleada.....	52
Figura 46. Aparato empleado para la destilación de agua en SUDSlab.	53

Figura 47. Museo Marítimo del Cantábrico.....	54
Figura 48. Granulometría de la mezcla AC-16 Surf D.....	55
Figura 49. Huecos en mezcla de la mezcla AC-16 Surf D.	56
Figura 50. Huecos en árido de la mezcla AC-16 Surf D.	56
Figura 51. Densidad de la mezcla AC-16 Surf D.	57
Figura 52. Probetas empleadas para determinar el óptimo de betún.	58
Figura 53. Granulometría de la mezcla PA-16.....	58
Figura 54. Árido pesado y preparado para fabricar probetas de PA-16.....	59
Figura 55. Al fondo recipientes con agua de mar y delante aquellos en los que se sumergían las probetas ya fabricadas.	64
Figura 56. Sal pesada para su posterior adición a la mezcla.....	64
Figura 57. Momento en el que se añade la sal en la fabricación de las probetas.	65
Figura 58. Sal sin triturar en betún 50/70 antes y después de remover.....	66
Figura 59. Sal triturada en betún 50/70 antes y después de remover.	66
Figura 60. Preparación del árido saturado en agua con sal antes de emplearlo en la fabricación de la mezcla.....	67
Figura 61. Agitación del árido en la disolución de agua salada para que esta disolución envuelva a todo el árido.....	67
Figura 62. Extracción del agua con sal tras tres días.....	67
Figura 63. Costra de sal que aparece tras el secado del árido.	68
Figura 64. Terrón de árido tras el secado del mismo.....	68
Figura 65. Termo-sensor dentro de las probetas.	70
Figura 66. Midiendo la temperatura interior de las probetas.	70
Figura 67. Temperatura en un ciclo de hielo-deshielo.....	71
Figura 68. Temperatura cinco ciclos de hielo-deshielo.....	71
Figura 69. Tiempo que cada muestra está en contacto con hielo.	72

Figura 70. Recipientes para ciclos de hielo-deshielo.	73
Figura 71. Congelador y estufa para ciclos de hielo-deshielo.....	73
Figura 72. Estufa para ciclos de hielo-deshielo.	73
Figura 73. Situación de Santander (España).	74
Figura 74. Probetas secas y probetas sumergidas a la intemperie.....	75
Figura 75. Temperatura máxima y mínima diaria en Santander.	75
Figura 76. Inmersión de las probetas para determinar su densidad.	77
Figura 77. Contenido de huecos de aire (V_m).	78
Figura 78. Bastidor de ensayo con bandas de carga y probeta.	79
Figura 79. Máquina empleada para la compactación por impacto.....	80
Figura 80. Comprobación de la temperatura del baño.....	80
Figura 81. Probetas en el baño.....	81
Figura 82. Probeta preparada para ser ensayada a tracción indirecta.	82
Figura 83. Probetas rotas tras ser ensayadas a tracción indirecta.	82
Figura 84. Fabricación de mezcla bituminosa en amasadora.....	83
Figura 85. Aspecto de la mezcla recién envuelta.	84
Figura 86. Compactación por medio de un compactador de placa con rodillo de acero.	84
Figura 87. Aspecto de una probeta para el ensayo de rodadura recién compactada.	85
Figura 88. Máquina del ensayo de rodadura.....	85
Figura 89. Detalle de la inmersión de una probeta en el ensayo de rodadura en agua.	86
Figura 90. Probeta en el ensayo de rodadura en agua.	86
Figura 91. Aspecto de la rodada de una probeta tras el ensayo de rodadura.....	87
Figura 92. Máquina de Los Ángeles e introducción de una probeta en ella.....	88
Figura 93. Aspecto de una probeta tras el ensayo cántabro.....	89

Figura 94. Diagrama módulo resiliente.	89
Figura 95. Ejemplo de equipo de ensayo necesario para obtener el módulo resiliente.	90
Figura 96. Elementos necesarios para la preparación de las probetas.	91
Figura 97. Herramienta empleada para colocar las pletinas sobre un diámetro.....	91
Figura 98. Máquina empleada para la obtención del módulo resiliente.....	92
Figura 99. Probeta preparada para ser ensayada.....	93
Figura 100. Amplitud de deformación.	93
Figura 101. Máquina empleada para la obtención del módulo resiliente.....	94
Figura 102. Desfase entre la sollicitación aplicada y la respuesta del material.....	95
Figura 103. Probeta en el momento de ser serrada.....	96
Figura 104. Medición de las probetas.....	96
Figura 105. Principios básicos de la flexión en 4 puntos.....	97
Figura 106. Probeta siendo ensayada para la obtención del módulo dinámico.....	98
Figura 107. Compactación y serrado de las probetas de fatiga.	100
Figura 108. Aspecto de una probeta tras ser ensaya a fatiga.	100
Figura 109. Resumen de ensayos realizados en la mezcla AC-16 Surf D.	104
Figura 110. Resumen de ensayos realizados en la mezcla PA-16.	108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición granulométrica que debe tener el cloruro sódico.	13
Tabla 2. Propiedades de las mezclas bituminosas.	32
Tabla 3. Prestaciones acopio 0/6,3.....	46
Tabla 4. Prestaciones acopio 4/12,5.....	47
Tabla 5. Prestaciones acopio 12,5/20.....	47
Tabla 6. Prestaciones acopio 16/31,5.....	47
Tabla 7. Prestaciones acopio 0/2.....	48
Tabla 8. Características del polvo mineral.....	49
Tabla 9. Características de los betunes empleados.	50
Tabla 10. Tipo de ligante a emplear en hormigón bituminoso para capa de rodadura y siguiente....	51
Tabla 11. Tipo de ligante a emplear en mezclas drenantes y discontinuas.	51
Tabla 12. Resultados para la dotación de ligante en la mezcla AC-16 Surf D.	56
Tabla 13. Relación filler-betún recomendable.....	57
Tabla 14. Series sumergidas en agua con sal.....	63
Tabla 15. Series con sal añadida como árido.....	65
Tabla 16. Series con árido sumergido en agua con sal.....	68

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. MARCO

Hoy en día, una de las principales funciones que se da a la sal (NaCl) (Figura 1) en la ingeniería civil es su uso en carreteras en aspectos de conservación y vialidad invernal. Esparcir sal o salmuera sobre la superficie del firme es uno de los métodos más empleados para que no se formen placas de hielo sobre las carreteras. Pero su uso en la lucha contra el hielo no se basa únicamente en este método, también se emplea como árido en forma de aditivo anticongelante.



*Figura 1. Sal.
Fuente: Elaboración propia.*

El esparcimiento de sal para evitar la formación de hielo sobre las calzadas se debe principalmente a dos factores. El primero de ellos es debido a sus propiedades químicas. La sal está compuesta por cristales de cloruro sódico (NaCl). Cuando la sal se disuelve en agua, los iones de sodio (positivo) y de cloro (negativo) ya no están sujetos dentro de la red cristalina y son capaces de atraer al hidrógeno y al oxígeno de la molécula de agua rompiendo los puentes de hidrógeno característicos de la misma. Esto produce que el agua en presencia de una cierta concentración de sal necesite una temperatura mucho menor de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ para alcanzar el punto de congelación, aproximadamente de $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperatura que usualmente no se llega a alcanzar en las carreteras en España en ningún momento del año. El segundo factor que hace que el uso de la sal sea muy extendido es su precio y su disponibilidad, estando garantizada en la mayoría de los países (Figura 2).



*Figura 2. Extensión de sal en una calle y camión esparciendo sal para evitar la formación de hielo.
Fuente: Castro, C. (2009) [5] y Valenzuela, A. (2012) [70].*

Si bien hay países, sobre todo del norte de Europa, que no permiten esparcir sal para evitar la formación de hielo en las calzadas, sí que es una práctica habitual en gran cantidad de Administraciones. Los países que descartan el uso de la sal en las carreteras lo hacen sobre todo atendiendo al impacto negativo que el exceso de sal puede ejercer sobre la fauna, la flora y los acuíferos que estén en las proximidades de la carretera. Otra de las razones que existen contra esta técnica es la corrosión que sufren las carrocerías de los vehículos por efecto de las salpicaduras de agua con sal que se producen al rodar vehículos sobre las carreteras tratadas de este modo.

En cualquier caso, la sal también puede afectar al asfalto debido a motivos que no tengan que ver con la vialidad invernal, tales como, zonas cálidas en las que llegan sales al pavimento o zonas próximas al mar, como autopistas cercanas a la costa o los propios pavimentos portuarios (Figura 3).



*Figura 3. Área portuaria pavimentada con mezcla bituminosa.
Fuente: Elaboración propia.*

El daño que sufren las mezclas bituminosas (Figura 4) es un problema que afecta al conjunto de la sociedad dado que forma parte del medio de transporte más comúnmente empleado. Este problema se va acrecentando año tras año debido a que, no sólo se está constantemente incrementando el número de desplazamientos, sino también a que el nivel de exigencia de los usuarios sobre las infraestructuras es mayor conforme se van construyendo carreteras y autopistas de mejor calidad. Este deterioro al que se ven sometidos los pavimentos es más notorio en las capas de rodadura y está influenciado por el volumen de tráfico, las cargas que transmiten los ejes, pero también por las condiciones climatológicas y los tratamientos a los que se ven sometidos los pavimentos. La lluvia, el hielo y los cambios de temperatura favorecen el deterioro de las mezclas bituminosas.



*Figura 4. Daño causado en el pavimento.
Fuente: Elaboración propia.*

Determinar cómo todos estos factores influyen en el desgaste de los diferentes tipos de mezcla bituminosa supone un reto para la comunidad. Del éxito a la hora de poder cuantificar y prever estos daños, dependerá el que se pueda aumentar la vida útil de estas infraestructuras.

1.2. OBJETIVOS

El propósito de esta Tesis Doctoral es el estudio de la influencia de la sal en las mezclas bituminosas en porcentajes de sal cercanos al agua marina, muy inferiores a los de la salmuera comúnmente empleada en vialidad invernal, para los cuales otros investigadores ya han realizado estudios y ya se conocen los daños causados. En la realización de esta Tesis se evaluaron dos tipos de mezcla bituminosa que se disponen comúnmente en capas de rodadura de firmes de carretera (una AC-16 Surf D y una PA-16); y tres tipos de afección de la sal a la mezcla: sumergir la mezcla bituminosa ya fabricada en agua salada con distintas proporciones de sal, añadir sal como árido a la mezcla y sumergir árido en agua con una determinada cantidad de sal para posteriormente fabricar mezcla bituminosa con ello.

Los objetivos principales que persigue esta Tesis Doctoral son:

- Corroborar la efectividad de la sal como agente que produce un retraso en la formación de hielo sobre las carreteras.
- Caracterizar las propiedades mecánicas que ofrecen distintos tipos de mezcla bituminosa en función del tratamiento de sal al que se ven sometidos.
- Evaluar la influencia que ejercen los cambios de temperatura, incluidos ciclos de hielo-deshielo, en el comportamiento mecánico a corto y largo plazo, así como en la durabilidad que tienen las mezclas bituminosas en ambientes con presencia salina.
- Evaluar la adhesividad entre el árido y el ligante en distintos tipos de mezclas bituminosas en presencia de sal.
- Comparar los resultados obtenidos en cada tipo de mezcla y discutir la idoneidad de cada una de ellas en función de la presencia de diferentes concentraciones de sal a la hora de la fabricación, antes y después de la misma.

1.3. ARTÍCULOS PUBLICADOS Y ORGANIZACIÓN

Esta Tesis Doctoral se realiza en consonancia con el Real Decreto 99/2011 de Consejo de Gobierno 17/10/2019, con la normativa de la Escuela de Doctorado de la Universidad de Cantabria y con la correspondiente al Programa de Doctorado en Ingeniería Civil (PDIC) como un compendio de tres artículos publicados previamente en revistas científicas indexadas en el “Journal of Citation Reports (JCR)” del Institute for Scientific Information (ISI) – “Web of Knowledge (WoK)”.

Los artículos publicados son los siguientes:

SODIUM CHLORIDE EFFECT IN THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE BITUMINOUS MIXTURES

Luis Juli-Gándara, Ángel Vega-Zamanillo, Miguel Á. Calzada-Pérez.

Cold Regions Science and Technology, 164,102776, 2019

DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.05.002



EFFECT OF SODIUM CHLORIDE ON THE MODULUS AND FATIGUE LIFE OF BITUMINOUS MIXTURES

Luis Juli-Gándara, Ángel Vega-Zamanillo, Miguel Á. Calzada-Pérez, Evelio Teijón-López-Zuazo.

Materials, 13, 2126, 2020.

DOI: 10.3390/ma13092126



materials

IMPACT OF TEMPERATURE CHANGES AND FREEZE—THAW CYCLES ON THE BEHAVIOUR OF ASPHALT CONCRETE SUBMERGED IN WATER WITH SODIUM CHLORIDE

Ángel Vega-Zamanillo, Luis Juli-Gándara, Miguel Á. Calzada-Pérez, Evelio Teijón-López-Zuazo.

Applied Sciences, 10, 1241, 2020.

DOI: 10.3390/app10041241



applied sciences

Debido a que esta Tesis Doctoral se ajusta al formato de compendio de artículos, la misma contiene en primer lugar el desarrollo del estado del arte en el que se apoyan los artículos publicados. A continuación se procede a describir los materiales empleados en los distintos artículos así como la metodología seguida, describiendo tanto los procedimientos como los ensayos realizados. Posteriormente se adjuntan los tres artículos publicados con sus propios resultados. Finalmente se exponen las conclusiones obtenidas y las futuras líneas de investigación a través de las cuales se podría continuar trabajando.

CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE

2.1. INFLUENCIA DE LA SAL EN LAS CARRETERAS

2.1.1. La sal como compuesto químico

La sal empleada en esta tesis es cloruro sódico (NaCl). Se trata de un compuesto cristalino formado por moléculas con un átomo de sodio y un átomo de cloro. Este compuesto es producto de un enlace iónico que se produce por la atracción electrostática entre ambos átomos debido a una transferencia de electrones (Figura 5). Al unirse estos dos átomos para formar la molécula de cloruro sódico, el sodio queda ionizado positivamente (Na^+), mientras que el cloro queda ionizado negativamente (Cl^-).

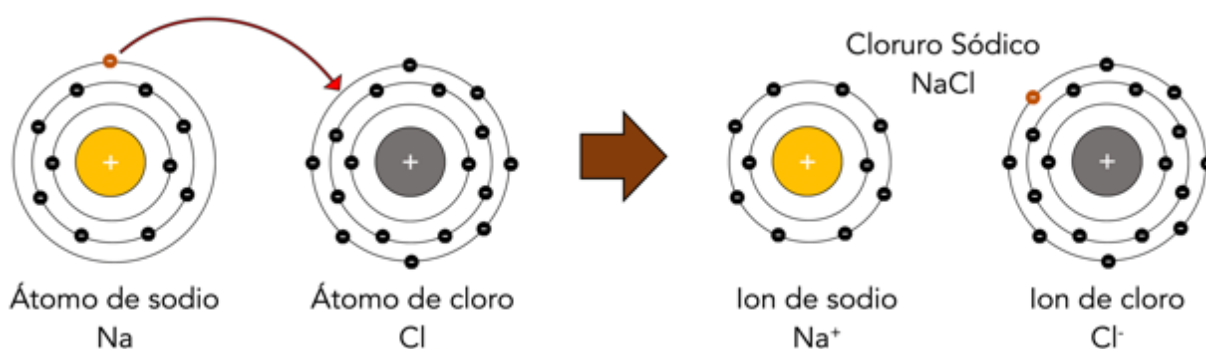


Figura 5. Enlace de cloruro sódico.

Fuente: Elaboración propia.

Estos iones se organizan en una red cristalina cúbica debido a las fuerzas electrostáticas. Cada ion Cl^- queda rodeado de seis iones Na^+ (Figura 6).

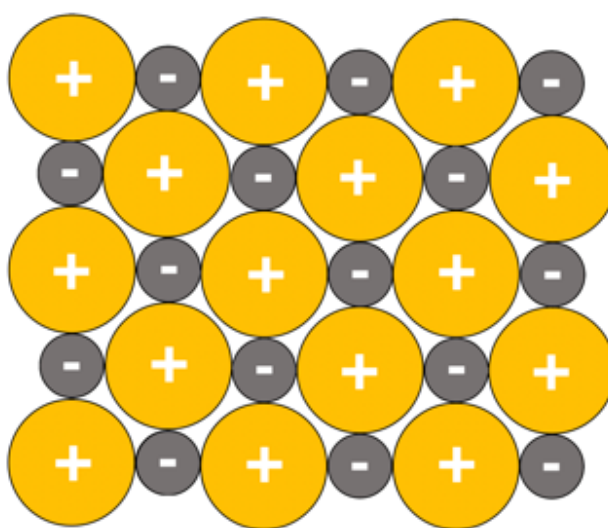


Figura 6. Red cristalina del cloruro sódico (NaCl).

Fuente: Elaboración propia.

Los iones que conforman el cloruro sódico, al disolverse en el agua, ya no están firmemente organizados en una red cristalina y son capaces de atraer al hidrógeno y oxígeno que forman la molécula de agua, rompiendo los puentes de hidrógeno característicos del agua (Figura 7).

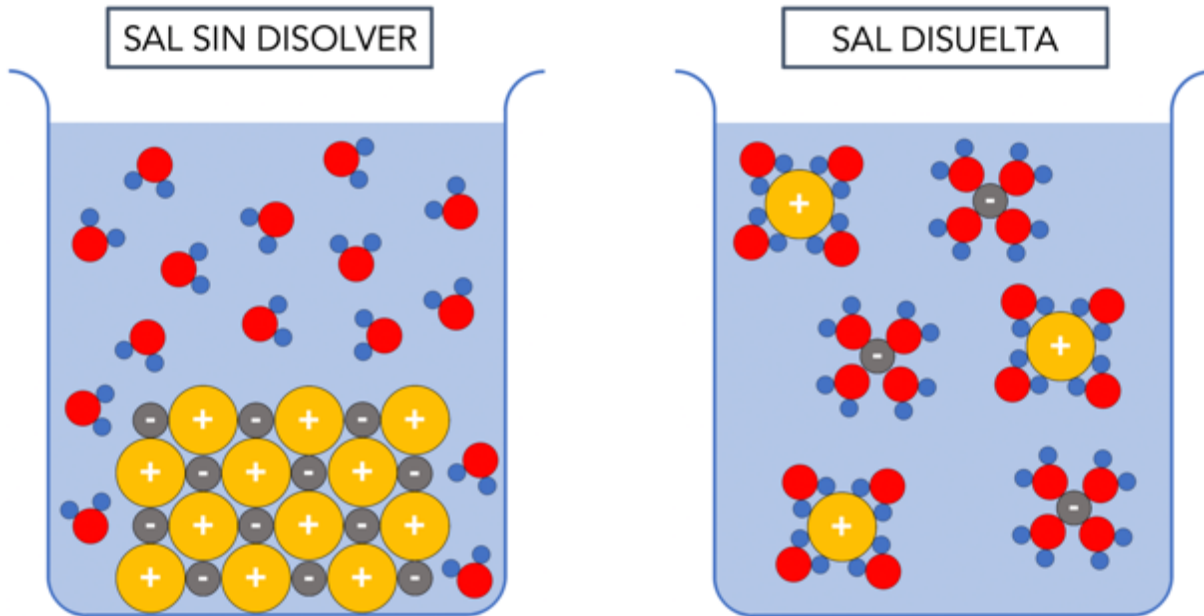


Figura 7. Esquema de comportamiento de la sal en el agua.
Fuente: Elaboración propia.

La disolución de agua y sal, tal y como indicaron Aleksandrov, A. A. et al. (2013) [1] tiene una conductividad térmica más pequeña que la del agua destilada.

2.1.2. Vialidad invernal

La vialidad invernal en carreteras es la actividad que, principalmente en zonas de alta montaña, asegura las condiciones de circulación de la red en las mejores circunstancias, de tal forma que el tráfico por ellas se realice siempre con la mayor seguridad, confortabilidad y fluidez posibles; y así prolongar la vida útil de la carretera y tratar de mantener su valor patrimonial.

Como se ha mencionado anteriormente, el principal uso para el que se emplea la sal (NaCl) en la ingeniería civil es su aplicación en vialidad invernal, tanto como fundente, como para formar parte de aditivos que se añaden a la mezcla para impedir o retrasar la formación de hielo sobre las calzadas.

En la actualidad en el ámbito de la ingeniería civil, el Pliego de Prescripciones Generales para las Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) [34] es la única norma que establece características que debe tener un producto comercial de cloruro sódico. Según el PG-3 [34], el cloruro sódico ha de tener en su composición química al menos un 97 % de NaCl. Así mismo determina que su composición granulométrica debe ajustarse a la expuesta en la Tabla 1.

Cedazos y tamices UNE	Cernido ponderal acumulado
6,3	80 - 100
2,5	5 - 50
0,63	0 - 10

Tabla 1. Composición granulométrica que debe tener el cloruro sódico.
Fuente: PG-3 [34].

2.1.2.1. Fundentes

Los fundentes son materiales con capacidades para evitar daños en los pavimentos, en circunstancias climatológicas adversas, mediante la fusión del hielo o la nieve.

Tal y como expusieron Asenjo, J. et al. (2017) [2], desde principios de los años sesenta, tratar las carreteras con fundentes es una técnica habitual en la mayoría de los países. Los primeros materiales empleados como fundentes eran arenas, gravillas, polvo de carbón o escorias fragmentadas. Se trata de materiales muy abrasivos que presentaban multitud de inconvenientes. Es a partir de los años setenta cuando se empieza a generalizar el empleo de fundentes químicos, como es el caso del cloruro sódico.

Todos los fundentes químicos actúan de manera similar. El proceso por el cual este tipo de fundentes consigue impedir la formación de hielo consiste en disminuir el punto de congelación del agua a temperaturas por debajo de los 0 °C. Para lograr este objetivo es imprescindible que los fundentes secos se disuelvan. Esta humedad que requieren para disolverse proviene de la nieve sobre el pavimento o de la humedad del ambiente.

En la superficie de una calzada helada coexisten moléculas de agua líquida y de agua sólida (hielo). Conforme avanza el tiempo, si la temperatura es igual o inferior a 0 °C y no existe presencia de fundentes, el agua líquida va transformándose paulatinamente en hielo. Si mientras dura dicho proceso existe una aportación de un fundente químico, éste se disuelve en el agua líquida sin incorporarse al hielo. De esta manera, el fundente disminuye la temperatura de congelación del agua por debajo de

los 0 °C y rompe la tendencia de transformación de agua líquida a hielo, cambiándola justamente por la contraria. A partir de dicho momento son las moléculas de agua en fase sólida las que se van transformando en moléculas de agua líquida. La aportación de fundente produce un descenso mayor de la temperatura de congelación conforme se aumenta la cantidad de fundente; esto se cumple hasta un límite a partir del cual la temperatura de congelación vuelve a ascender. Este límite es conocido como punto eutéctico. El punto eutéctico y su correspondiente temperatura y concentración eutéctica aparecen en el diagrama de estado de los diferentes fundentes (Figura 8).

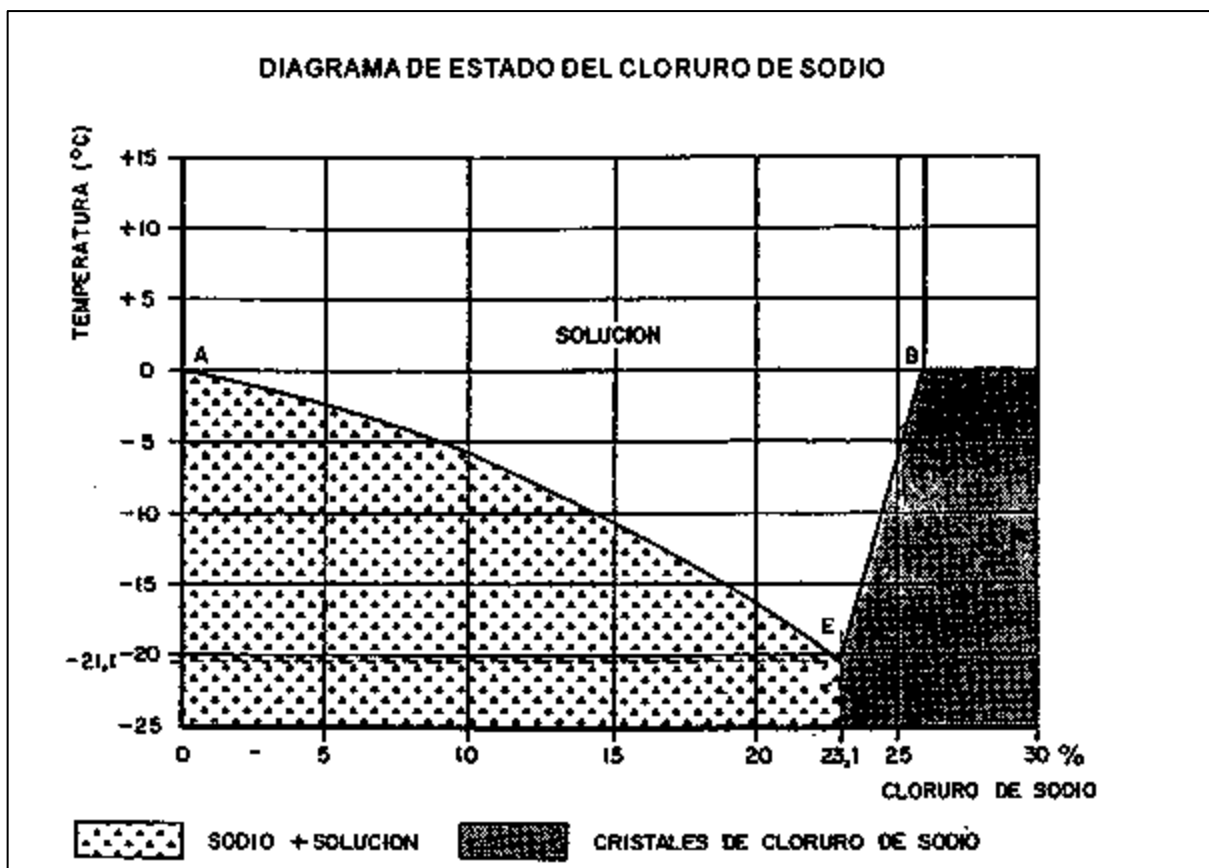


Figura 8. Diagrama de estado del cloruro sódico.

Fuente: Asenjo, J. et al. (2017) [2].

Aunque el límite físico es el que establece el punto eutéctico, los fundentes dejan de ser eficientes mucho antes, ya que el tiempo que estos requieren para ser efectivos comienza a incrementarse notablemente a partir de cierto punto (Figura 9).

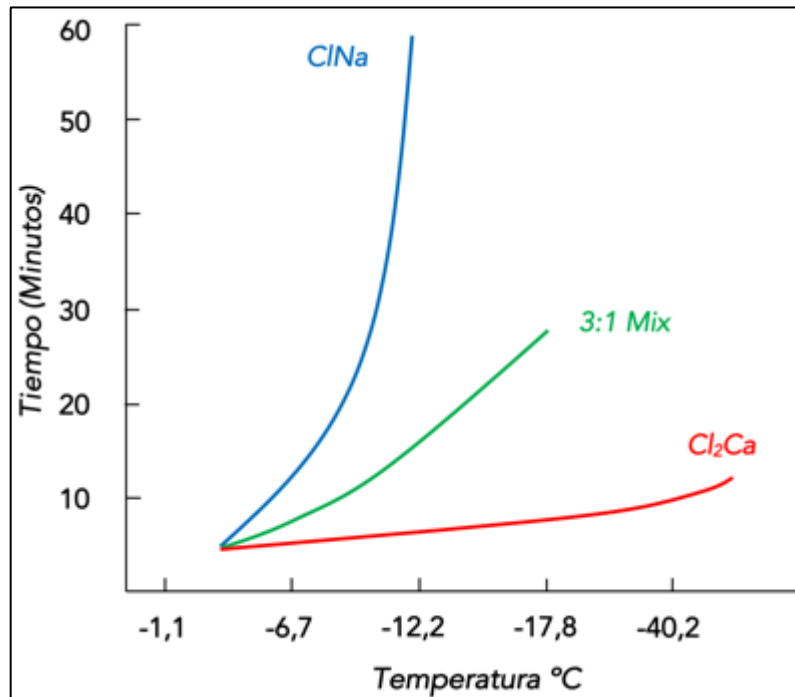


Figura 9. Tiempo de acción de NaCl y CaCl₂ en función de la temperatura.
Fuente: Asenjo, J. et al. (2017) [2].

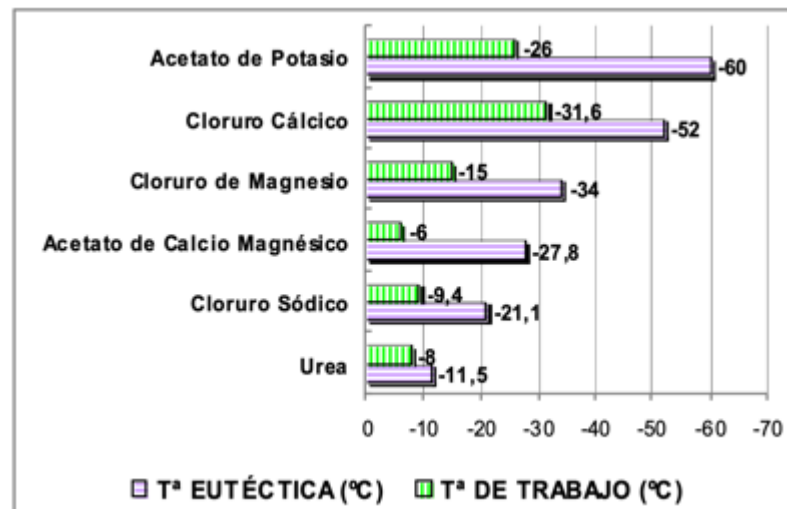


Figura 10. Temperatura eutéctica y de trabajo de distintos fundentes.
Fuente: García, L. (2010) [13].

A la temperatura a partir de la cual el fundente comienza a no ser eficiente se la conoce como temperatura de trabajo (Figura 10). A modo de ejemplo, las temperaturas eutéctica y de trabajo del cloruro sódico son -21,1 °C y -9,4 °C; y para el cloruro cálcico -52 °C y -31,6 °C, respectivamente. La diferencia en estos valores se debe a que el cloruro sódico, al reaccionar con el agua para disolverse, genera una reacción con carácter endotérmico. Esto quiere decir que requiere de un aporte exterior

de calor, del pavimento, la atmósfera o del propio tráfico, para poder dar lugar al nuevo producto (solución NaCl y agua). Sin embargo, el cloruro cálcico al disolverse en agua genera una reacción exotérmica. Como se apuntará más adelante, la combinación de ambos tipos de reacciones hace su uso propicio de manera conjunta.

En cualquier caso, para comprender el proceso por el cual el hielo se funde en presencia del NaCl es de vital importancia tener en cuenta que el cloruro sódico es un material higroscópico. Esta propiedad produce, en primer lugar, que la humedad de la atmósfera se condense en vapor de agua sobre la superficie de los cristales que lo conforman, lo que provoca que el calor latente de evaporación se reintegre en el ambiente. Esta cesión de calor provoca que la solución acuosa que va formándose sobre la superficie de los cristales de sal disminuya su temperatura hasta alcanzar el valor correspondiente a la solución saturada (-21,2 °C). Cuando esta disolución se encuentra a dicha temperatura, en general, se encuentra muy por debajo del punto de rocío de la atmósfera, lo que de nuevo provoca un aporte de calor adicional al ambiente debido a la condensación. Este proceso se produce hasta que todos los cristales de sal se disuelven en una solución saturada con una concentración de NaCl del 23,1 % y una temperatura de -21 °C. Paralelamente a este proceso, y debido a estos constantes aportes de calor al ambiente próximo, es por lo que se produce la descongelación del hielo que existe sobre el pavimento (Figura 11).

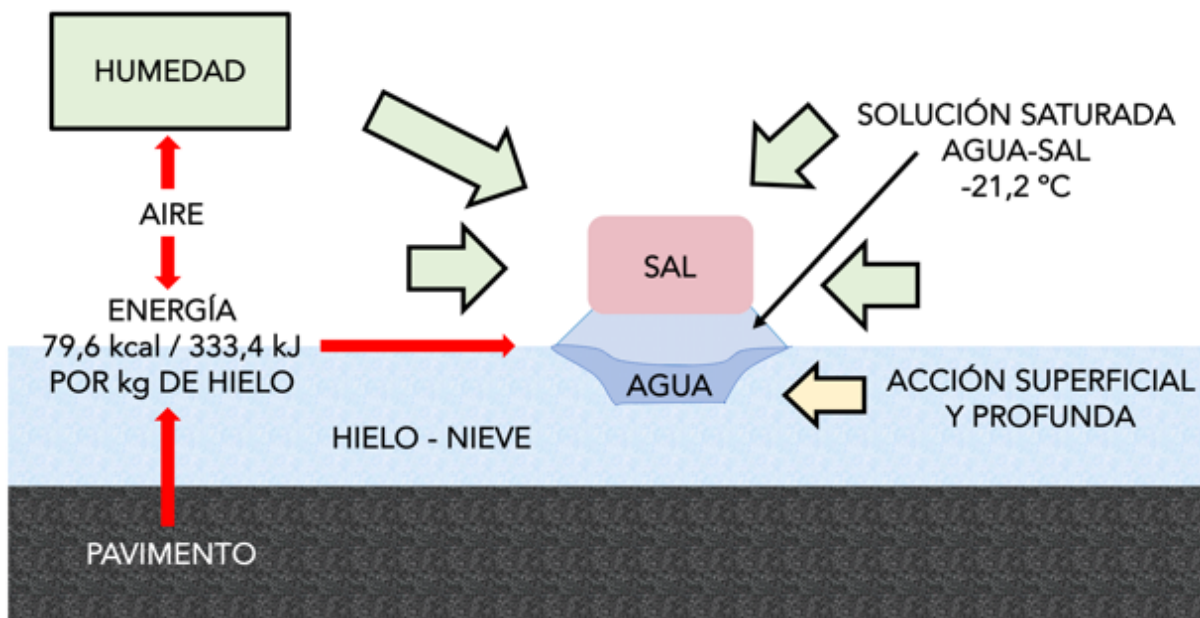


Figura 11. Proceso de descongelación del hielo debido a la sal en el pavimento.
Fuente: Asenjo, J. et al. (2017) [2].

Sabiendo esto, hay que tener en cuenta ciertos riesgos que puede producir el empleo del cloruro sódico como fundente. Por ejemplo, la aparición de nieblas o lluvias persistentes produce efectos de disolución excesiva y “lavado” de la superficie que conllevan la consiguiente falta de protección hacia la formación de placas de hielo.

Como ya se ha comentado, el cloruro sódico no es el único material con capacidades fundentes, Muthumani, A. et al. (2013) [25] realizaron una recapitulación de estudios anteriores con ánimo de comparar los resultados que tienen diferentes tipos de fundente indicando sus pros y sus contras. En la misma línea García, L. (2010) [13] indicó que, si bien existen muchos fundentes en el mercado, algunos de ellos presentan problemas tales como: toxicidad, volatilidad, inflamabilidad o no están suficientemente estudiados para determinar su utilidad y seguridad. Teniendo en cuenta estos factores, consideró que los fundentes más empleados son el cloruro sódico, el cloruro cálcico (CaCl_2), la urea, el cloruro de magnesio, el acetato de calcio y magnesio y el acetato de potasio. Si bien la generalizada elección del primero de ellos se debe a diversos factores:

- Temperatura eutéctica. El cloruro sódico tiene una temperatura de eutéctica de $-21,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. En general en la Península Ibérica esta temperatura no se suele alcanzar.
- La gran compatibilidad con el cloruro cálcico. Esta propiedad hace que, como ya se ha comentado, en situaciones en las que la temperatura disminuya de los $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la efectividad del cloruro sódico disminuya, se pueda añadir cloruro cálcico a este y asegurarse la eficacia hasta los $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figura 9).
- Su versatilidad. Puede emplearse en tratamientos tanto preventivos como curativos y en forma sólida o en salmuera.
- Su disponibilidad. Se trata de un material que tiene asegurada su disponibilidad en muchas zonas.
- Su precio. Se trata de un material con un precio mucho más competitivo que el de sus competidores (Figura 12).

Aunque puede observarse que el precio del cloruro sódico es muy inferior al del resto de fundentes, Shi, X. et al. (2013) [37] señalaron que, para poder hacer una comparación entre los distintos tipos de fundente en el aspecto económico, habría que añadir al coste nominal del fundente el coste de los impactos negativos que estos producen tanto al medio ambiente, como sobre las infraestructuras de transporte y los vehículos.

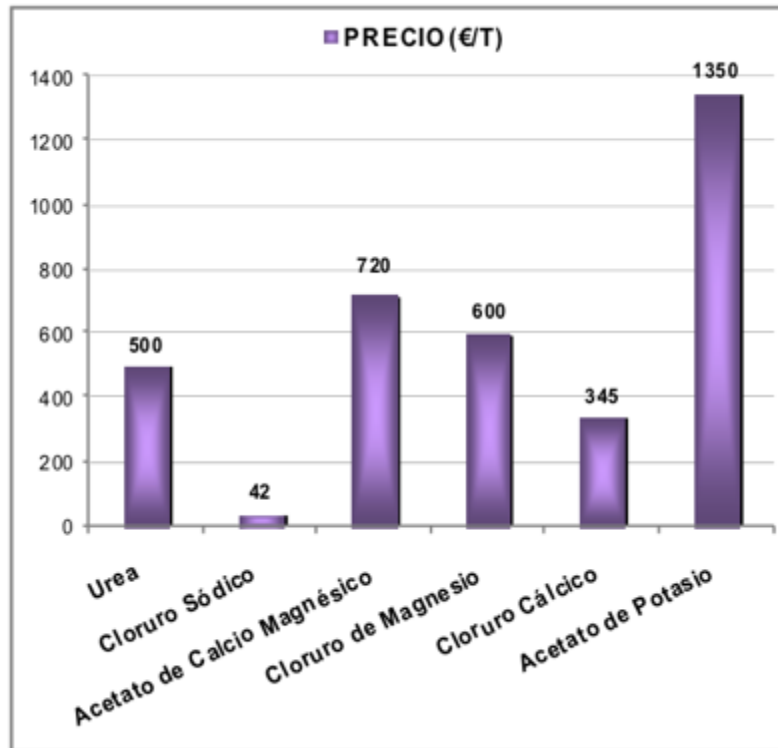


Figura 12. Precio por tonelada de los principales fundentes existentes.

Fuente: García, L. (2010) [13].

En cualquier caso, debido al conjunto de las citadas propiedades, durante la campaña de vialidad invernal 2009/2010 en España según Azcue, L. (2010) [3] se emplearon 32.000 toneladas de NaCl y 80.000 metros cúbicos de salmuera, una cantidad muy superior a las 1.400 toneladas de CaCl_2 (Figura 13). Del mismo modo Azcue, L. [3] indicó que, si bien el empleo de la salmuera en el pasado era de carácter preventivo, la tendencia indica que su uso como tratamiento curativo contra hielo y nieve se está extendiendo.

Para las circunstancias concretas en las que el ion cloro del cloruro sódico puede poner en riesgo ciertas estructuras (puentes y estructuras de hormigón armado) García, L. [13] indicó que una solución que se contempla es el uso como fundente del acetato de calcio y magnesio, que aun teniendo un precio muy superior al del NaCl, es el fundente más seguro para el hormigón. Otro aspecto a tener en cuenta a la hora de elegir el cloruro sódico como fundente es el impacto medioambiental negativo que produce.

CONSUMO FUNDENTES CAMPAÑA 2009/2010				
UNIDAD DE CARRETERAS	CONSUMO REAL			RELACIÓN CONSUMO SALMUERA M³ / FUNDENTE SÓLIDO T.
	CLORURO SÓDICO (T.)	CLORURO CÁLCICO (T.)	SALMUERA LITROS	
DEMARCACIÓN DE ANDALUCÍA OCCIDENTAL				
HUELVA	313,02			0,00%
SEVILLA	31,00			0,00%
CÓRDOBA	972,40		52.000,00	5,00%
CÁDIZ	0,00	0,00	0,00	0,00%
CEUTA				
DEMARCACIÓN DE ANDALUCÍA ORIENTAL				
JAÉN	3.611,17	60,00	1.326.500,00	37,00%
MÁLAGA	14,00		9.800,00	70,00%
GRANADA	450,00			0,00%
ALMERÍA	0,00	0,00	0,00	0,00%
MELILLA	0,00	0,00	0,00	0,00%
DEMARCACIÓN DE ARAGÓN				
ZARAGOZA	11.549,88		6.210.780,00	54,00%
HUESCA	8.867,61	14,40	234.726,00	3,00%
TERUEL	13.559,56		2.150,00	0,00%
DEMARCACIÓN DE ASTURIAS				
ASTURIAS	6.668,00	24,00	841.900,00	13,00%
DEMARCACIÓN DE CANTABRIA				
CANTABRIA	9.555,00	15,40	3.045.950,00	32,00%
DEMARCACIÓN DE CASTILLA LA MANCHA				
TOLEDO	11.642,40	4,63	3.767.524,00	32,00%
C.REAL	9.480,50		2.960.221,00	31,00%
CUENCA	10.976,68	27,21	2.560.866,00	23,00%
ALBACETE	14.461,30	11,70	4.726.346,00	33,00%
GUADALAJARA	13.428,16	46,16	520.731,00	4,00%
DEMARCACIÓN DE CASTILLA LEÓN OCCIDENTAL				
LEÓN	18.824,54	17,120		0,00%
ZAMORA	9.996,50	13,80	3.410.300,00	34,00%
SALAMANCA	7.575,30	0,00	307.000,00	4,00%
PALENCIA	8.906,00	0,00	4.247.240,00	48,00%
VALLADOLID	8.207,46	40,43	3.869.550,00	47,00%
DEMARCACIÓN DE CASTILLA LEÓN ORIENTAL				
BURGOS	22.290,82	45,01	5.027.904,68	23,00%
SORIA	14.249,46	110,65	2.593.300,00	18,00%
SEGOVIA	9.306,00	49,70	1.194.000,00	13,00%
ÁVILA	5.180,60	13,74	885.400,00	17,00%
DEMARCACIÓN DE CATALUÑA				
BARCELONA	1.787,00	1,75	183.159,00	10,00%
TARRAGONA	2.081,14		622.825,48	30,00%
LL EIDA	10.260,00	17,69	4.832.932,00	47,00%
GIRONA	4.602,80	25,00	712.850,00	15,00%
DEMARCACIÓN DE EXTREMADURA				
CÁCERES	1.534,40	0,00	350.350,00	23,00%
BADAJOS	779,25		1.133.850,00	146,00%
DEMARCACIÓN DE GALICIA				
A CORUÑA	3.170,75	4,00	0,00	0,00%
LUGO	15.852,75	13,12	2.576.901,44	16,00%
OURENSE	6.312,00	12,50	531.914,00	8,00%
PONTEVEDRA	1.904,00	26,00	1.388.000,00	73,00%
DEMARCACIÓN DE MADRID				
MADRID	30.982,90		13.334.830,00	43,00%
DEMARCACIÓN DE MURCIA				
MURCIA	1.082,50	0,80	553.300,00	51,00%
DEMARCACIÓN DE LA RIOJA				
LA RIOJA	5.860,61	76,86	316.175,00	5,00%
DEMARCACIÓN DE VALENCIA				
CASTELLON	1.606,10	2,70	1.468.000,00	91,00%
VALENCIA	9.028,97	7,21	3.041.316,00	34,00%
ALICANTE	2.085,36	2,85	882.529,00	42,00%
TOTAL	319.047,89	1.378,51	79.723.121	25,00%

Figura 13. Consumo de fundentes por Demarcaciones en España en la campaña 2009/2010.
Fuente: Azcue, L. (2010) [3].

Este impacto negativo sobre el medio ambiente está ampliamente estudiado. Norrström, A. C. et Jacks, G. (1998) [31] indicaron que la sal que alcanza los suelos de zonas cercanas a carreteras, debido al uso de ésta como agente de deshielo, promueve la dispersión de coloides. Más tarde, Bäckström, M. et al. (2004) [4] y Norrström, A. C. (2005) [30] señalaron que el aumento en las concentraciones de metales pesados tales como cadmio, cobre, plomo y zinc en dichas zonas está claramente relacionado con el uso de agentes de deshielo que tengan en su composición cloro, como es el caso del cloruro sódico. Bäckström, M. et al. [4] concluyeron que esta movilización pone en riesgo acuíferos poco profundos de agua potable. Engelsens, C. J. et al. (2012) [10] añadieron que también se encuentran efectos de incrementos estacionales en las cantidades de cromo y molibdeno a consecuencia del uso de la sal como fundente en invierno. Los resultados de Snodgrass, J. W. et al. (2017) [38] indicaron que las prácticas modernas de gestión de aguas pluviales no protegen las aguas superficiales de la contaminación por sal derivada de la vialidad invernal. Por lo que se acaba contaminando el agua subterránea con iones Cl^- y Na^+ . Rivett, M. O. et al. (2016) [35] demostraron que, en las proximidades de carreteras tratadas con sal como agente de deshielo, las descargas de aguas pluviales sobre los acuíferos son una importante fuente de cloruros para los mismos (Figura 14). Este hecho ha de tenerse en cuenta a la hora de gestionar cuándo y en qué cantidad hay que esparcir la sal sobre las carreteras.

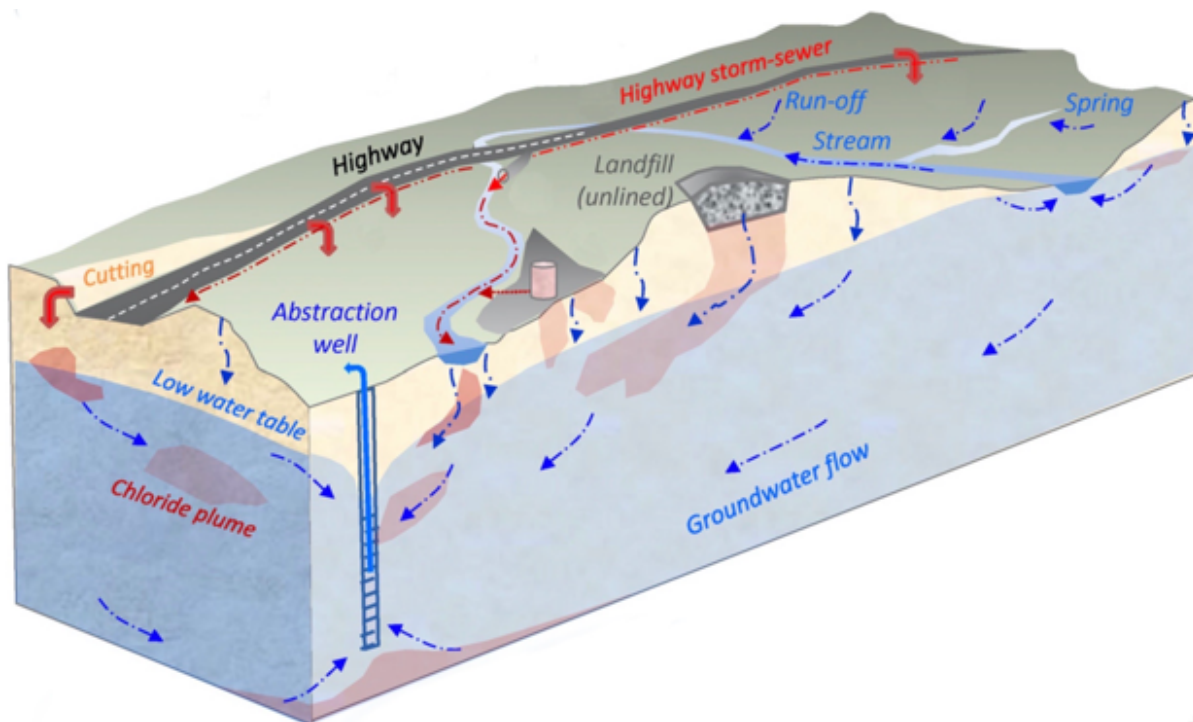


Figura 14. Modelo de escorrentía e infiltración en el entorno de una carretera
Fuente: Rivett, M. O. et al. (2016) [35].

En la línea de crear herramientas que ayuden a determinar cuál es la cantidad y el momento más idóneo para tratar con sal las superficies de los pavimentos buscando un equilibrio entre producir el mínimo impacto negativo sobre el medio ambiente y mantener la seguridad vial requerida, Trenouth, W. R. et al. (2015) [42] propusieron una herramienta especialmente indicada para zonas vulnerables a la acción de la sal que, empleando el método del índice de temperatura modificado, permite de manera sencilla pero efectiva tomar decisiones más eficientes acerca de cuándo tratar con sal las carreteras. Por otro lado, Ikiz, N. et Galip, E. (2016) [19] diseñaron un programa informático basado en un árbol de decisiones que, en una primera fase, determina a través de las previsiones de diversos datos meteorológicos (temperatura, precipitación,...) la dotación de sal que hay que extender (Figura 15). Transcurrido un tiempo, el mismo programa, mediante una segunda fase que tiene en cuenta el volumen de vehículos que han circulado, el tipo de mezcla bituminosa, los datos meteorológicos que se han producido durante el intervalo y la previsión para las siguientes horas, determina si es necesario volver a aplicar un tratamiento con sal o si el que se aplicó en primer lugar es aún suficiente para evitar la formación de placas de hielo.

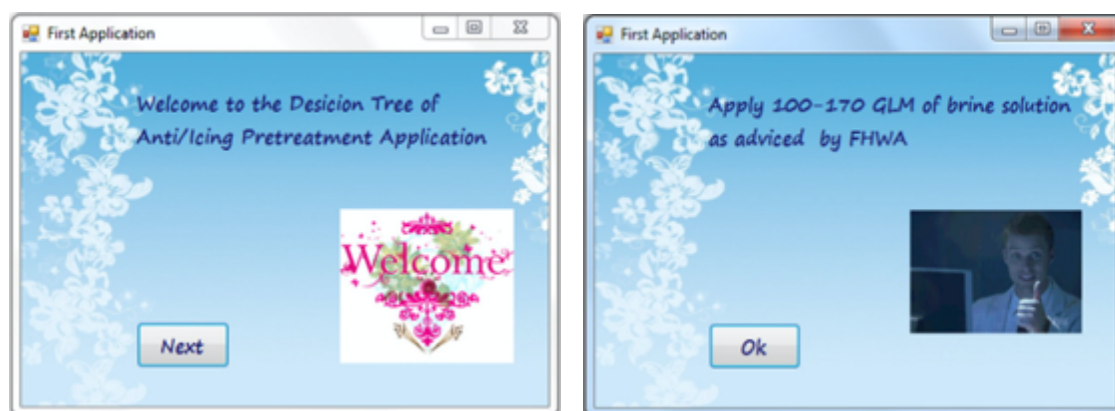


Figura 15. Programa informático para determinar la dotación de sal necesaria.

Fuente: Ikiz, N. et Galip, E. (2016) [19].

Según Lysbakken, K. R. et al. (2012) [24] no existe un método bien documentado para determinar la cantidad de sal que permanece en el pavimento, si bien indicaron que SOBO-20 (Figura 16) es uno de los instrumentos más comúnmente utilizados por los equipos de vialidad invernal para calcular dichas cantidades de sal, aunque su fiabilidad no se ha demostrado. En el mismo estudio, tras realizar una serie de mediciones sobre pavimentos con: sal disuelta (salmuera), sal seca y sal recristalizada, concluyeron que SOBO-20 es un instrumento preciso y fiable para medir la salmuera en mezclas bituminosas. Sin embargo, indicaron que subestima en gran medida la cantidad de sal seca o recristalizada ya que sólo tiene en consideración la porción de sal disuelta.



Figura 16. Operarios realizando una medida con SOBO-20 en la A-2 en Madrid.

Fuente: Fonnesbech, J. K. (2009) [12].

En la misma línea de disminuir el uso de fundentes para reducir el impacto medioambiental de los mismos, Klein-Paste, A. et Wåhlin, J. (2013) [21] señalaron que el hielo al estar en contacto con los agentes de deshielo (NaCl u otros), se debilita (Figura 17). De este modo, el fundente, no sólo produce un descenso en la temperatura a la que el agua se congela, sino que el empleo de una cantidad un 40 % inferior a la definida por la teoría para que desaparezca el hielo es suficiente para que el tratamiento sea efectivo. El debilitamiento que esta cantidad de fundente produce es ya suficiente para que el peso del tráfico sobre el hielo produzca que este último se quiebre y no sea resbaladiza la superficie.

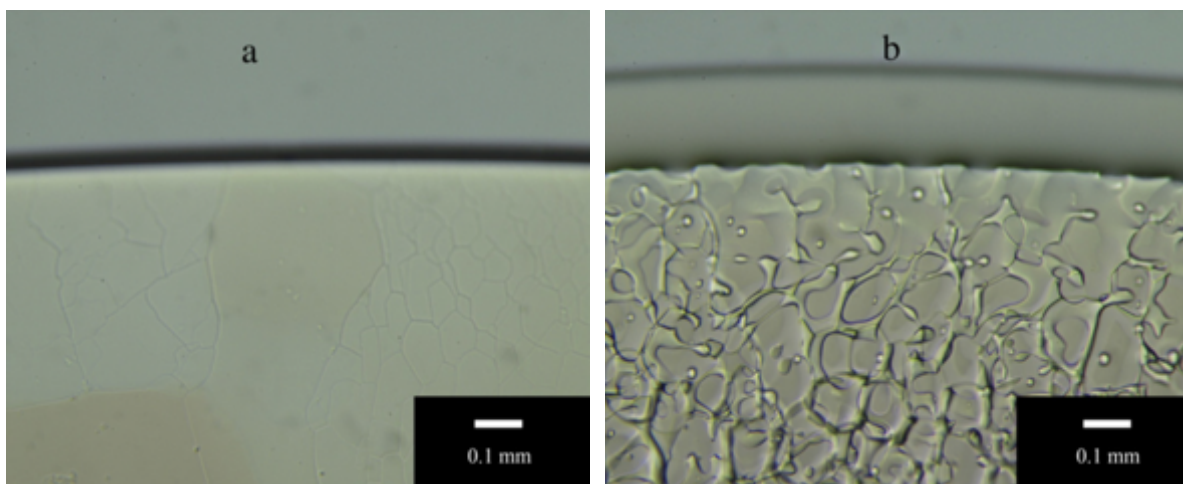


Figura 17. Hielo con agua destilada y hielo con agua con sal.

Fuente: Klein-Paste, A. et Wåhlin, J. (2013) [21].

En cuanto a los efectos que la sal, como agente de deshielo, produce sobre las mezclas bituminosas existen diversas investigaciones. Wang, D. et al. (2015) [72] estudiaron la influencia que tienen diversos

agentes de deshielo (sal, arena y polvo de cuarzo) en la resistencia al deslizamiento de las capas de rodadura de una mezcla AC 8 DS. Llegaron a la conclusión de que, en términos de resistencia al deslizamiento y a la seguridad del tráfico rodado, la sal es la opción óptima entre las estudiadas ya que elimina la película de betún que existe en la superficie del pavimento sobre los áridos de manera muy rápida, mientras que después prácticamente no pule el árido (Figura 18).

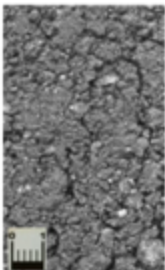
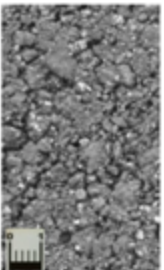
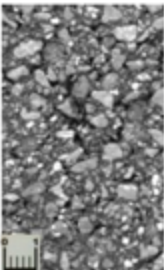
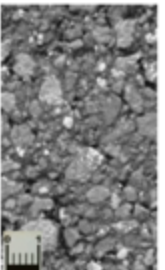
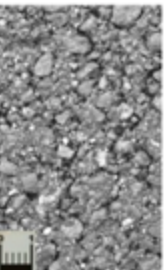





Variant	V1: without polishing agent	V2: with quartz powder	V3: with quartz sand I	V4: with quartz sand II	V5: with de-icing salts
Example of images					
Schematic drawing					
Description (surface)	Only peaks of the aggregates are exposed.	~30% bitumen is removed from the top of the aggregates.	The binder is completely removed from the top of the aggregates so that almost all stone grains can be seen.		
Description (polishing effect)	Exposed grains are hardly polished.	The micro-texture of exposed grains is light smoothened.	The edge sharpness of the stones grains is strongly smoothened.		The stone grains on the surface are not polished.

Figura 18. Efecto de distintos tipos de agentes de deshielo sobre el pulimentado de las mezclas bituminosas.

Fuente: Wang, D. et al. (2015) [72].

Por otro lado, Hassan, Y. et al. (2002) [17] sugirieron a través de su investigación que, si bien existen nuevos materiales como el acetato de potasio y el formiato de sodio, que cumplen la función de agentes de deshielo, su uso y su sustitución por los fundentes tradicionales, cloruro sódico y urea, debe supeditarse a un estudio completo que cuantifique y compare los posibles efectos perjudiciales de todos ellos. Por ello, en una primera fase de su estudio, determinaron la concentración crítica que producía un mayor daño a la mezcla bituminosa. Para ello realizaron el ensayo sobre un tipo de mezcla bituminosa, con dos tipos de árido diferentes y los cuatro tipos de fundentes antes descritos, más una serie sumergida en agua destilada a modo de referencia. Determinaron que, para todos los casos, el mayor daño se producía para concentraciones de fundente en el entorno de un 1 - 2 % (Figura 19). En la segunda fase de la investigación, diversas pruebas fueron realizadas sobre unos testigos obtenidos del Aeropuerto Internacional Macdonald-Cartier de Ottawa. Estos testigos fueron sumergidos en agua destilada con la concentración crítica de los diferentes tipos de fundentes, a dos series de ciclos de hielo-deshielo (25 y 50 ciclos) y posteriormente se midió su pérdida de peso (APWL), su resistencia a tracción indirecta (ITS) y se realizó un ensayo de penetración sobre el betún recuperado. Concluyeron

que las propiedades mecánicas de todas las muestras ensayadas, incluidas las sumergidas en agua destilada, fueron significativamente más bajas que las de las muestras secas. Sin embargo, no se presentó un descenso significativo en el deterioro de las propiedades mecánicas debido a la exposición al acetato de potasio, al formiato de sodio o al cloruro sódico en comparación con las muestras sumergidas en agua destilada. De hecho, el cloruro sódico fue el único fundente que obtuvo valores superiores a los del agua destilada en el ensayo ITS tanto para los 25 como para los 50 ciclos de hielo-deshielo, alcanzando unos valores un 11 % y un 8 % superiores respectivamente. También indicaron que, si bien la exposición a ciclos de hielo-deshielo tiene un efecto de ablandamiento sobre el betún recuperado, los fundentes tienen un efecto de endurecimiento.

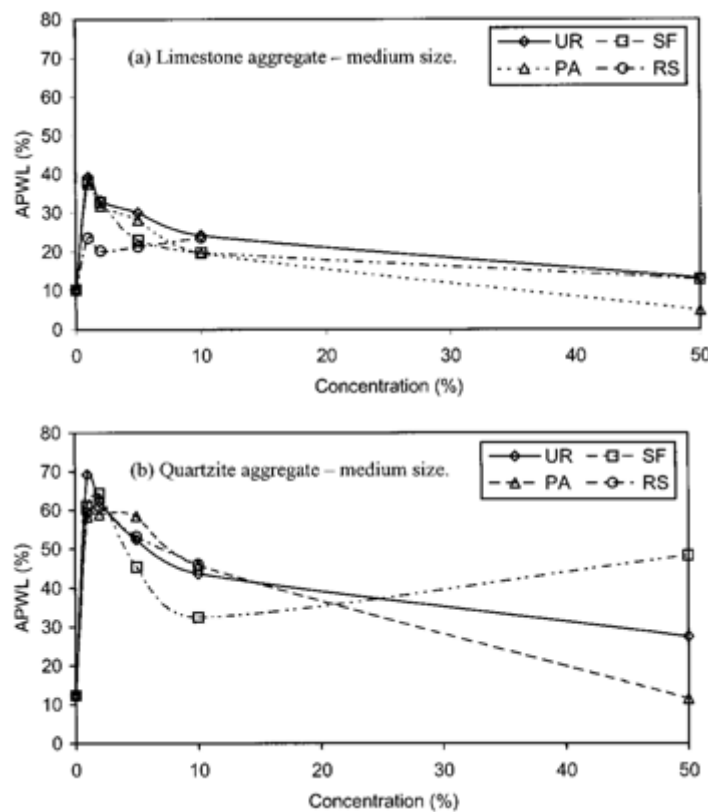


Figura 19. Determinación de la concentración de fundente que produce un daño crítico.
Fuente: Hassan, Y. et al. (2002) [17].

Tino, R. (2015) [41] estudió el daño producido por la extensión de sal y una salmuera (75 % en peso de H_2O y 25 % de $NaCl$) sobre las mezclas bituminosas. Para ello, sometió a las muestras a ensayos estáticos: resistencia a compresión simple, inmersión-compresión, resistencia a la tracción indirecta, sensibilidad al agua y al ensayo dinámico de rigidez. También realizó un estudio en las deflexiones de un firme sometido tanto a un elevado tráfico, como a unas condiciones de mantenimiento muy

exigentes con continuos tratamientos en época invernal con sal y salmuera. Los resultados de los ensayos estáticos muestran que los daños que los fundentes producen sobre las mezclas bituminosas no aumentan de manera significativa con respecto a los daños que produce por sí misma la presencia del agua. Sin embargo, el ensayo dinámico indica que la mezcla se ve afectada tanto por el agua como en mayor medida por la solución salina, rigidizándose en los primeros momentos del ensayo y para posteriormente sucederse una importante caída en su valor (Figura 20). Las deflexiones medias se vieron disminuidas en los primeros años de servicio, incrementándose con rapidez posteriormente. Tino, R. así mismo indicó que el uso de salmueras durante los periodos invernales conlleva un aumento de la humedad de las mezclas bituminosas, por lo que es necesario a la hora de esparcir este tratamiento conocer de manera fidedigna las condiciones meteorológicas en las horas siguientes, debido a que, si no es necesario esparcir la sal para evitar la formación de placas de hielo, esa salmuera puede producir un deterioro en la mezcla. También apuntó que el uso reiterado de tratamientos con salmueras y sal conduce a una evolución de la megatextura del firme mucho más rápida, lo que se manifiesta en la aparición pronta de defectos (baches, peladuras, pérdida de árido fino...).



Figura 20. Fisura en probeta sumergida en solución salina.

Fuente: Tino, R. (2015) [41].

Del mismo modo, Tino, R. señaló que, si bien los iones Na^+ del cloruro sódico disueltos en el agua son poco reactivos en el betún, los iones de Cl^- sí que interaccionan con los iones de azufre S^- que unen las cadenas de carbono que conforman el ligante. Estos iones de Cl^- se introducen entre los enlaces de las cadenas de carbono rigidizando y fragilizando al ligante, así como causando una pérdida de adherencia entre el betún y el árido.

2.1.2.2. Aditivos anticongelación

Como se ha mencionado con anterioridad, en la actualidad existen una serie de investigaciones que emplean diversos tipos de sales, incluido el cloruro sódico, como aditivos que se añaden a las mezclas para tratar de evitar, o al menos retrasar la formación de hielo sobre la superficie de las mismas.

Giuliani, F. et al. [15] emplearon en su estudio un filler anticongelante formado por una fracción no soluble en agua, compuesta principalmente por $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, MgCO_3 y SiO_2 , y una fracción soluble del entorno del 73 % compuesta en su totalidad por NaCl . Determinaron que la efectividad del relleno como anticongelante puede atribuirse a un proceso físico, principalmente relacionado con la disminución del punto de congelación del agua, posible gracias a la liberación de la sal directamente del ligante. En comparación con las mezclas de referencia, observaron que el filler anticongelante retrasa considerablemente la formación de hielo en la superficie del pavimento, ayuda a acelerar el proceso de fusión del hielo, y reduce la adhesión entre hielo y pavimento (Figura 21). Además, indicaron que la durabilidad de las capacidades anticongelantes del filler es bastante alta.

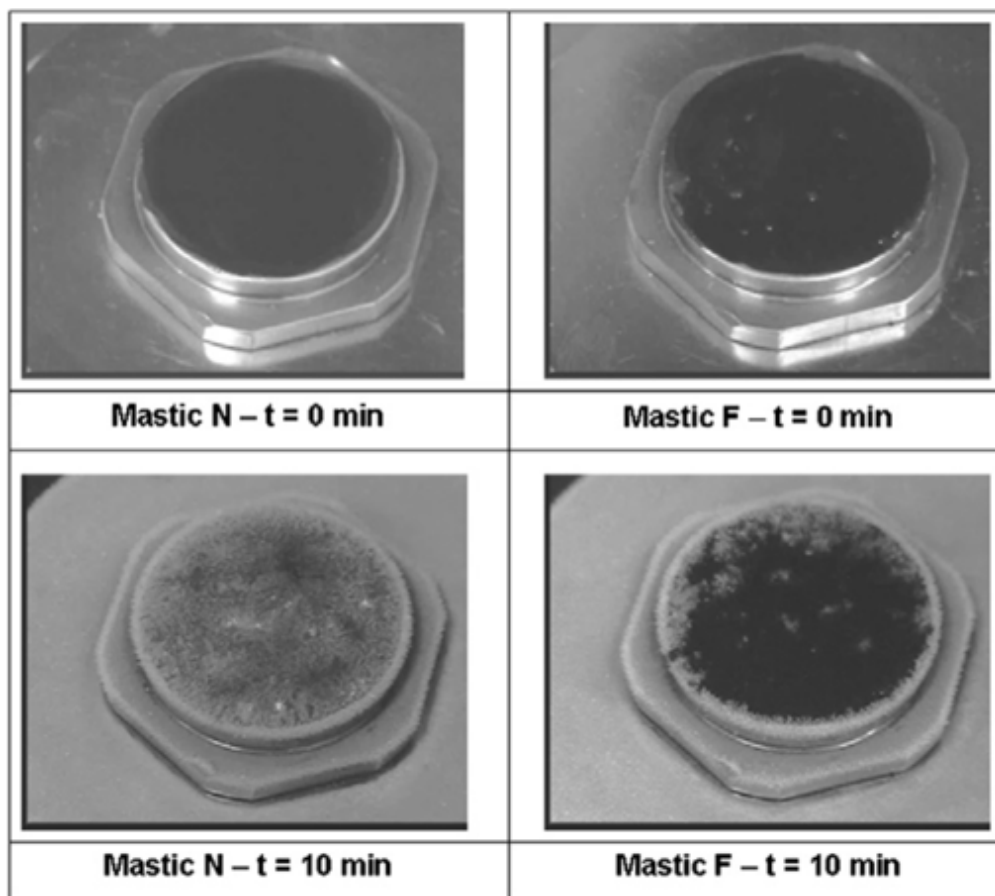


Figura 21. Comparación del proceso de congelación de muestras sin (N) y con (F) filler anticongelante.
Fuente: Giuliani, F. et al. [15].

Zheng, M. et al. [73] utilizaron como filler anticongelante un producto llamado V-260 (Figura 22) que tiene un contenido en cloruro cálcico del 94,6 %. Sus resultados a estabilidad Marshall y sensibilidad al agua indican un descenso de los dos valores respecto a la referencia cuando se emplea ese componente como filler. Aun así, ambos resultados superan los valores estándar.



Figura 22. Filler anticongelante V-260.
Fuente: Zheng, M. et al. [73].

Por otro lado, Del Pozo, J. et Albareda, J. [9] investigaron acerca de los microaglomerados en caliente en viabilidad invernal. Para ello emplearon un aditivo antihielo conformado por NaCl , CaCl_2 y siliconas, esta última hidrófuga, para actuar como elemento protector de la disolución eventual de las sales. Explicaron mediante el esquema que aparece en la Figura 23 el funcionamiento del aditivo. Éste consiste en formar una lámina de agua no congelada en contacto con la superficie de la calzada, la cual posibilita que la capa de hielo existente se rompa debido a la carga que ejercen los vehículos sobre ella, haciendo más fácil el contacto del neumático con la superficie del pavimento. Sus resultados mostraron que, si bien la mezcla de referencia y la mezcla con el aditivo antihielo obtuvieron resultados muy similares en el ensayo Marshall, en el ensayo de sensibilidad al agua la mezcla con filler antihielo obtuvo un resultado más bajo (aun así, por encima del 92 %) y en el ensayo de pista un resultado mejor que el de la mezcla de referencia. También concluyeron que el uso de este tipo de filleres tiene una importancia mayor en zonas especialmente sensibles de sufrir congelación en su superficie: tableros de puentes, zonas de umbría de desmontes o rampas.

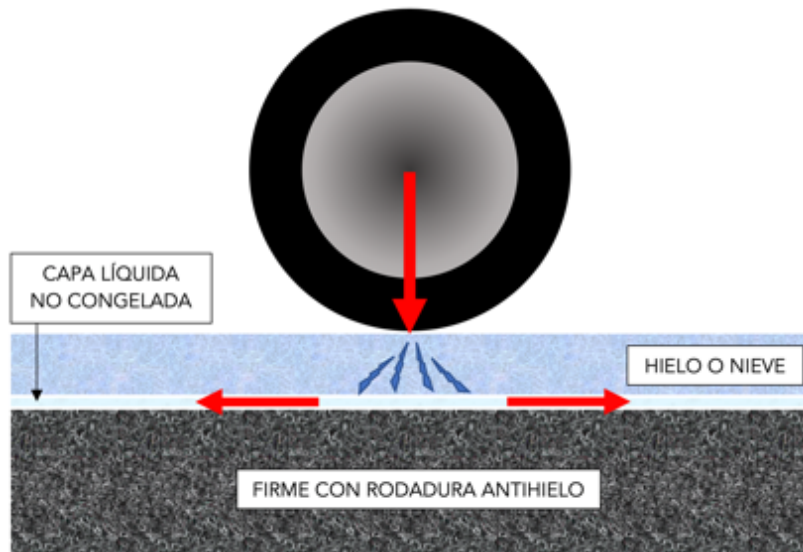


Figura 23. Esquema de funcionamiento del aditivo antihielo.
Fuente: Del Pozo, J. et Albareda, J. (2014) [9].

Liu, Z. et al. [23] utilizaron en su estudio una mezcla bituminosa tipo AC-13 y un tipo de filler anticongelante llamado ICB compuesto por NaCl y CaCl_2 . Ellos estudiaron la influencia que tiene la finura del filler anticongelante en las propiedades mecánicas de las mezclas bituminosas. Obtuvieron que el filler más fino alcanzó resultados mejores a sensibilidad al agua, un 7 % superior al de la mezcla de referencia (Figura 24), pero peores en el ensayo de rodadura. Liu, Z. et al. [23] observaron, del mismo modo que Del Pozo, J. et Albareda, J. [9], que debido al empleo de los filleres anticongelantes, aparece una película de agua entre la superficie del pavimento y la capa de hielo, hecho que favorece que la placa de hielo se rompa y los vehículos no deslicen.

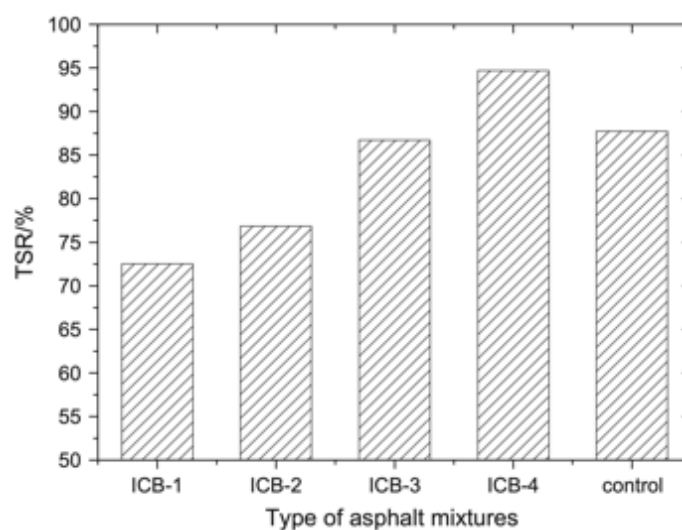


Figura 24. Resultados de sensibilidad al agua con diferentes finuras de filler anticongelante.
Fuente: Liu, Z. et al. [23].

2.1.3. Sal en climas cálidos y climas costeros

La influencia que tiene la sal en las mezclas bituminosas no se basa en exclusiva a su aplicación a la vialidad invernal. La sal también puede afectar a los firmes flexibles en climas cálidos, en suelos con presencia de sal o en zonas costeras en las que el agua del mar puede alcanzar tramos de carretera.

En cuanto a esta influencia que puede ejercer la sal en las mezclas bituminosas en zonas donde el clima es cálido, Obika, B. et al. (1989) [32] revisaron los conocimientos de los daños que las sales solubles pueden producir en pavimentos bituminosos delgados en climas cálidos. Estos daños son un problema que se reporta desde muchos lugares del mundo (Figura 25).

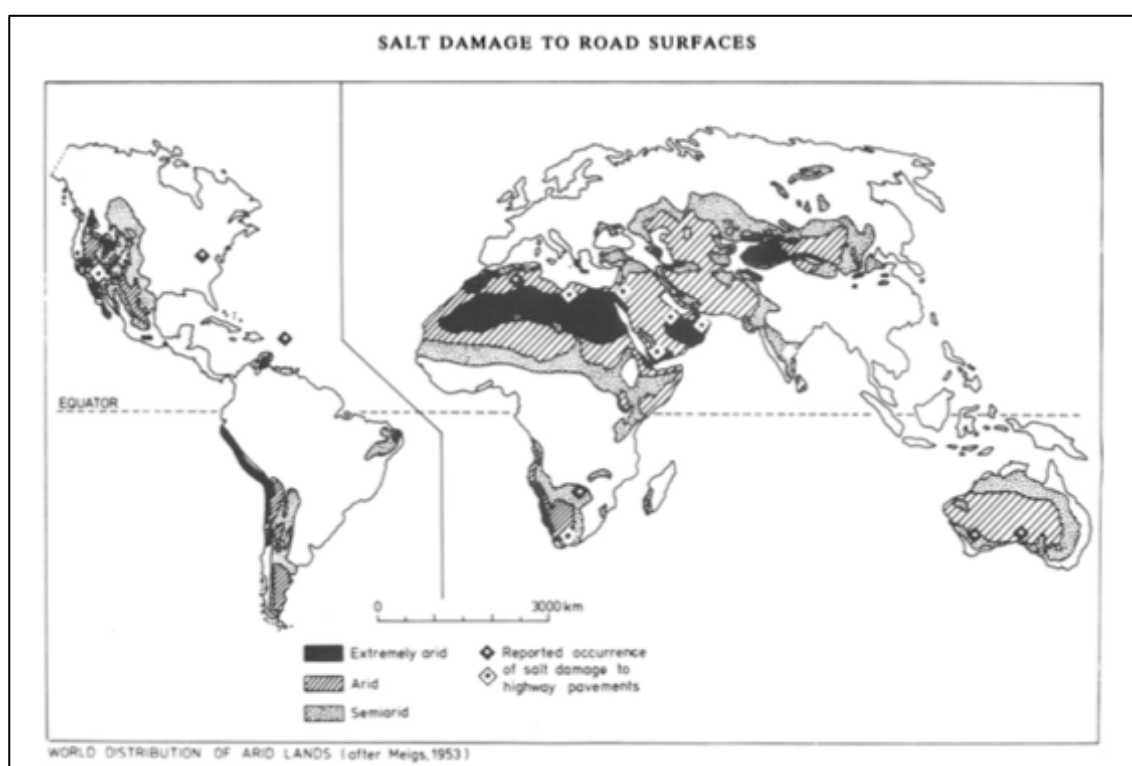


Figura 25. Mapa del mundo que muestra las zonas climáticas y los lugares donde se ha informado de daños de la sal en carreteras y pistas de aterrizaje.

Fuente: Obika, B. et al. (1989) [32].

Ellos examinaron los diversos límites de sal máximos recomendados en los materiales usados para la construcción de carreteras y repasaron las prácticas preventivas y correctivas. Mostraron la importancia de la geología, la hidrogeología y el clima en los daños que pueden producirse en los firmes bajo ambientes salinos, llegando a indicar que la sal puede afectar de manera importante en ambientes cálidos y secos debido a que los cristales que conforman la estructura del cloruro sódico producen presiones de cristalización destructivas para los pavimentos. Concluyeron que es esencial realizar, con

anterioridad a la construcción de pavimentos bituminosos, un estudio de caracterización de los regímenes de agua subterránea y de la presencia de sal en la zona de afección de dicho pavimento, máxime cuando el nivel freático se encuentra cercano a la superficie.

En relación con las mezclas bituminosas que se ven sometidas a la acción de ambientes salinos sobre ellas, Feng, D. et al (2010) [11] estudiaron cómo diversos tipos de mezclas (una AC, una AM y una OGFC) se ven afectadas por el agua de mar cuando éste inunda zonas de carretera que además estuvieran sujetas a situaciones de hielo-deshielo. Para simular esta situación realizaron dos procesos. Por un lado, mezclaron determinadas cantidades de sal con el betún y caracterizaron los nuevos betunes obtenidos a través de los ensayos de penetración, punto de reblandecimiento y ductilidad; por otro lado, sometieron a los tres tipos de mezcla antes citados a 2, 4, 6 y 8 ciclos de hielo-deshielo. Finalmente, obtuvieron que la sal juega un papel importante en el comportamiento del ligante asfáltico. Cuando el porcentaje de sal añadido al betún excede de un 3 % la deformabilidad del betún decrece rápidamente (Figura 26). También afirmaron que la sal afecta de manera decisiva a los resultados de sensibilidad al agua cuando el porcentaje de sal en agua excede de un 3 %, siendo los daños por los ciclos de hielo-deshielo el factor que más afecta a los resultados cuando el porcentaje es menor. Del mismo modo indicaron que el daño que sufre la mezcla bituminosa por los ciclos de hielo-deshielo incluye principalmente dos fases; una primera causada por la expansión del agua que resulta en una disminución en los resultados de sensibilidad al agua y una segunda que afecta a la interfaz árido-ligante que conduce a un incremento de la pérdida de partículas.

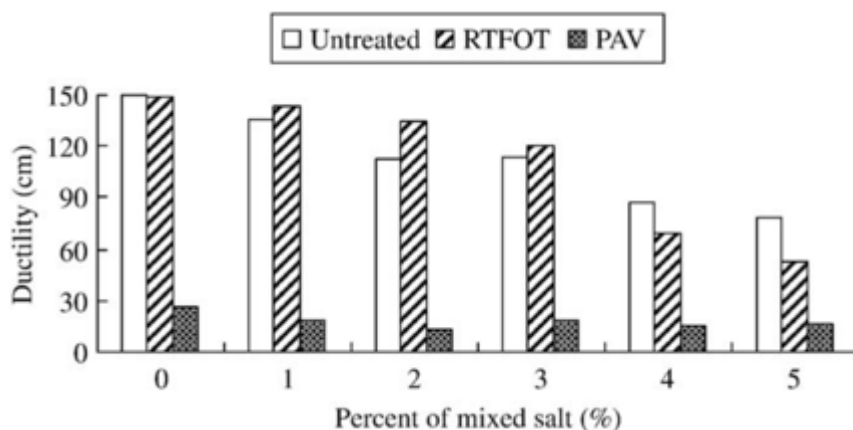


Figura 26. Ductilidad de distintos tipos de betún en función de la cantidad de sal añadida.

Fuente: Feng, D. et al (2010) [11].

2.2. MEZCLAS BITUMINOSAS

2.2.1. Propiedades de las mezclas bituminosas

Cada tipo de mezcla bituminosa tiene unas propiedades intrínsecas diferentes (Tabla 2). De esta manera, sus campos de aplicación son también diferentes. A priori, no es posible que un tipo de mezcla satisfaga todas las propiedades ya que algunas de las mismas son contrapuestas.

Adicionalmente, si la mezcla bituminosa va a ser colocada como capa de rodadura debe satisfacer una serie de requisitos no estructurales: luminosidad, color, sonoridad, impermeabilidad o limpieza.

Tal y como indicó Costa, A [6], existen dos tipos de factores que influyen en las propiedades que tiene una mezcla bituminosa. El primero de ellos son los factores pasivos. Reciben este nombre debido a que son intrínsecos al firme. Entre estos factores se incluye el espesor de la capa, los materiales o el proceso constructivo. El segundo tipo de factores son los activos. Este conjunto aglutina aquellos factores que varían en función de la actividad e intensidad a los que se ve sometido el firme (volumen de vehículos, número de ejes por vehículo, velocidad de los vehículos,...), así como factores climatológicos (temperatura, precipitación, radiación solar...).

Para poder determinar el comportamiento de las mezclas bituminosas en laboratorio, los estudios suelen incluir ensayos que evalúen estas propiedades. Los ensayos de resistencia a la tracción indirecta, y resistencia a las deformaciones plásticas son los más habituales. Si bien, tal y como señaló Tino, R. [41], en su investigación anteriormente comentada, y los estudios de Schlosser, F. et al. (2013) [36] y Deepa, S. et al. (2017) [8], las mezclas bituminosas son materiales que no pueden definirse completamente evaluando únicamente sus propiedades elásticas o plásticas. Las mezclas bituminosas son materiales viscoelastoplásticos y es por ello que conocer sus módulos dinámicos, su ángulo de desfase o la durabilidad mediante el ensayo de fatiga, son cuestiones de suma importancia.

Schlosser, F. et al. [36] señalaron que estas propiedades se evalúan mejor mediante ensayos dinámicos, con frecuencias entre los 6 y los 25 Hz. También indicaron que la temperatura a la que se realizan estos ensayos, generalmente entre los -20 y los +60 °C tiene un impacto significativo en los resultados.

Deepa, S. et al. [8] añadieron que, además de la frecuencia y la temperatura a la que se realiza el ensayo, es importante tener en cuenta el historial de carga que ha sufrido el material, introduciendo

periodos de descanso entre las diferentes frecuencias para así obtener unos resultados más acordes con la realidad.

Propiedad	Definición	Variables que pueden influir
Rigidez	Relación entre tensión de deformación para una determinada temperatura y tiempo de aplicación de carga	-Granulometría del árido -Rigidez del betún -Grado de compactación -Sensibilidad al agua -Contenido de betún
Resistencia a las deformaciones plásticas	Resistencia a la deformación permanente (generalmente a altas temperaturas y largos periodos de aplicación de la carga)	-Textura superficial del árido -Granulometría del árido -Rigidez del betún -Contenido de betún -Grado de compactación -Sensibilidad al agua
Durabilidad	Resistencia a los efectos climáticos (aire y agua) y a la acción de abrasivos del tráfico	-Contenido de betún -Naturaleza del betún -Granulometría del árido -Grado de compactación -Sensibilidad al agua
Resistencia a la fatiga	Capacidad de la mezcla para flexionarse repetidamente sin romperse	-Granulometría del árido -Contenido de betún -Grado de compactación -Rigidez del betún -Sensibilidad al agua
Resistencia a la fisuración	Resistencia de la mezcla a la fisuración por tensiones de tracción	-Granulometría del árido -Tipo de árido -Contenido de betún -Grado de compactación -Rigidez del betún -Sensibilidad al agua
Resistencia al deslizamiento	Capacidad de la mezcla para proveer un adecuado coeficiente de fricción entre el neumático y el pavimento en condiciones húmedas.	-Textura del árido -Resistencia al pulimento del árido -Granulometría del árido -Contenido de betún
Permeabilidad	Capacidad del aire, agua o vapor de agua para moverse dentro y a través de la mezcla	-Granulometría del árido -Contenido de betún -Grado de compactación

Tabla 2. Propiedades de las mezclas bituminosas.
Fuente: Kraemer, C. et al (2004) [22].

2.2.2. Ciclos de hielo-deshielo en las mezclas bituminosas

En determinadas zonas, tales como la alta montaña, las mezclas bituminosas durante la época invernal están sometidas a temperaturas muy bajas, incluso a temperaturas inferiores a 0 °C, lo cual produce una congelación del agua que pueda existir alrededor de la mezcla debido a la lluvia, la nieve, el granizo o la escorrentía. Es por ello que existen publicaciones que analizan la influencia que tienen los ciclos de hielo-deshielo en las mezclas bituminosas.

Goh, S. W. et You, Z. (2012) [16] evaluaron la eliminación de áridos finos y gruesos en la superficie de una mezcla bituminosa después de una serie de ciclos de hielo-deshielo rápidos, 8 ciclos por día durante 38 días. Para determinar el desprendimiento de los áridos recurrieron a imágenes de la superficie de la mezcla que escanearon con un escáner óptico de alta resolución y procesaron. A través de dichas imágenes (Figura 27) concluyeron que las grietas y la eliminación del árido aumentan conforme lo hace también el número de ciclos de hielo-deshielo.

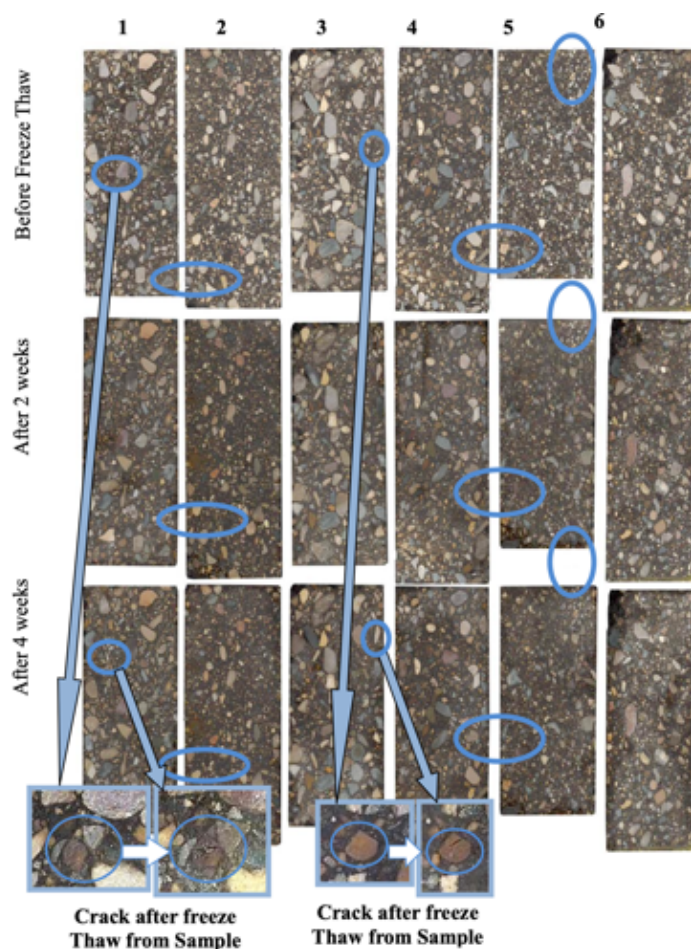


Figura 27. Muestras sometidas a ciclos de hielo-deshielo.
Fuente: Goh, S. W. et You, Z. (2012) [16].

Özgan, E. et Serin, S. (2013) [33] incidieron en la importancia de prever si la mezcla bituminosa va a verse sometida a la acción de ciclos de hielo-deshielo. Para ello ensayaron una mezcla AC, tanto una capa base como una capa de rodadura, bajo 6, 12, 18 y 24 ciclos de hielo-deshielo. A través de la evaluación de los distintos porcentajes de huecos (Figura 28) y el ensayo de estabilidad Marshall, determinaron que cuando la mezcla sufre este tipo de ciclos, el valor de la estabilidad se reduce (Figura 29). Por lo que conocer la sollicitación de ciclos de hielo-deshielo al que va a verse sometida la mezcla bituminosa debe influir a la hora de diseñarla.

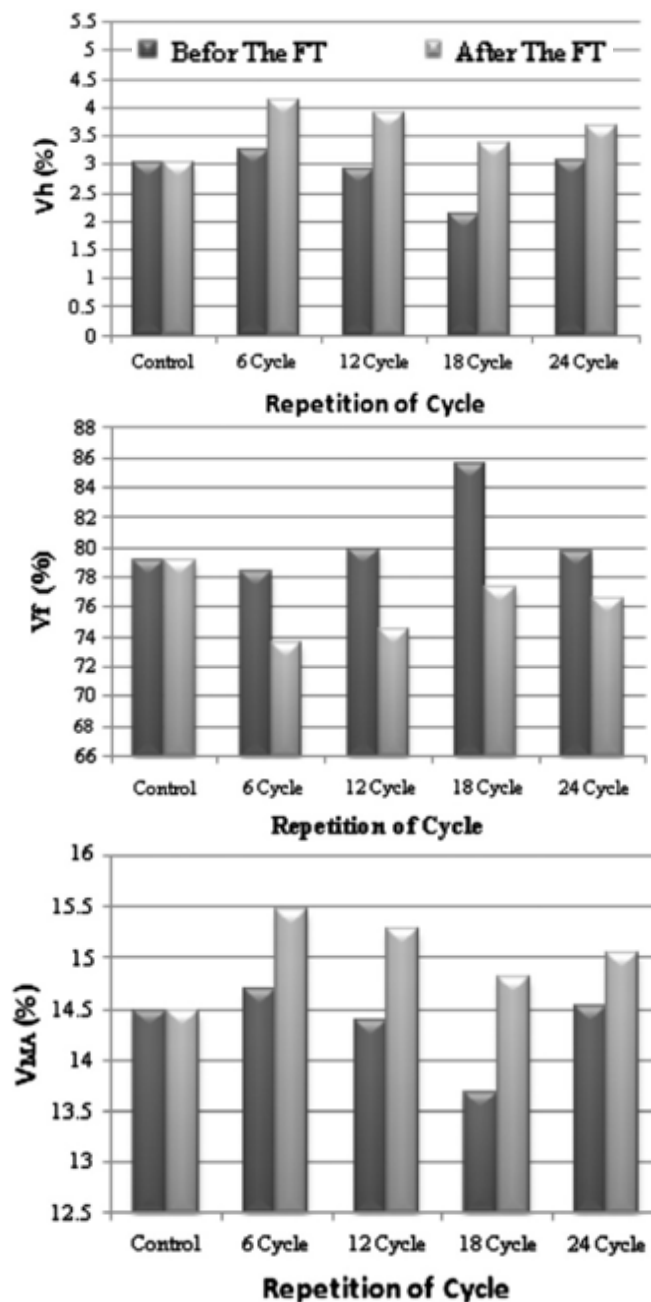


Figura 28. Huecos de una capa de rodadura en función de los ciclos de hielo-deshielo.

Fuente: Özgan, E. et Serin, S. (2013) [33].

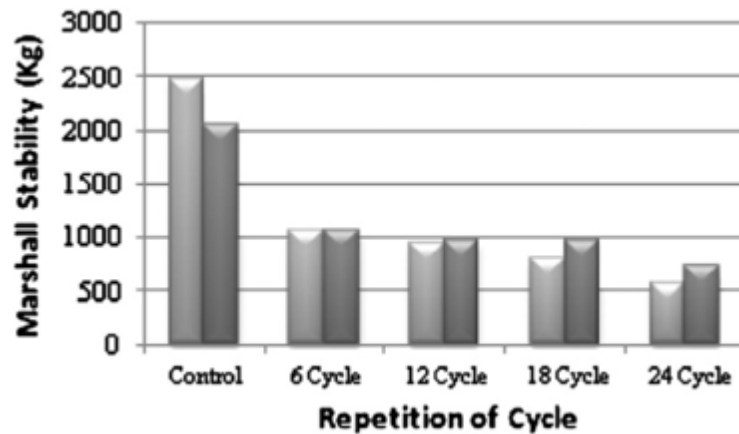


Figura 29. Estabilidad Marshall en función del número de ciclos de hielo-deshielo.

Fuente: Özgan, E. et Serin, S. (2013) [33].

Islam, M. R. et Tarefder, R. A. (2016) [20] estudiaron el efecto que ejercen los ciclos de hielo-deshielo (hasta un total de 150 ciclos) en una mezcla bituminosa con un 35 % de RAP. Estos ciclos consistían en permanecer 16 horas a -5°C y 8 horas a $+30^{\circ}\text{C}$. Una vez realizada cada serie de ciclos de hielo-deshielo, realizaron a las probetas ensayos de rigidez y de resistencia a la tracción indirecta. Obtuvieron una tendencia a la disminución de la rigidez conforme se aumenta el número de ciclos hasta los 120 y 150 ciclos, cuando se aprecia una asíntota con una reducción de la rigidez de un 25 y un 26 % respectivamente con respecto a la rigidez de la muestra de referencia que no sufrió ningún ciclo (Figura 30). Sin embargo, los resultados de resistencia a la tracción indirecta no muestran un cambio significativo conforme avanzan los ciclos de hielo-deshielo.

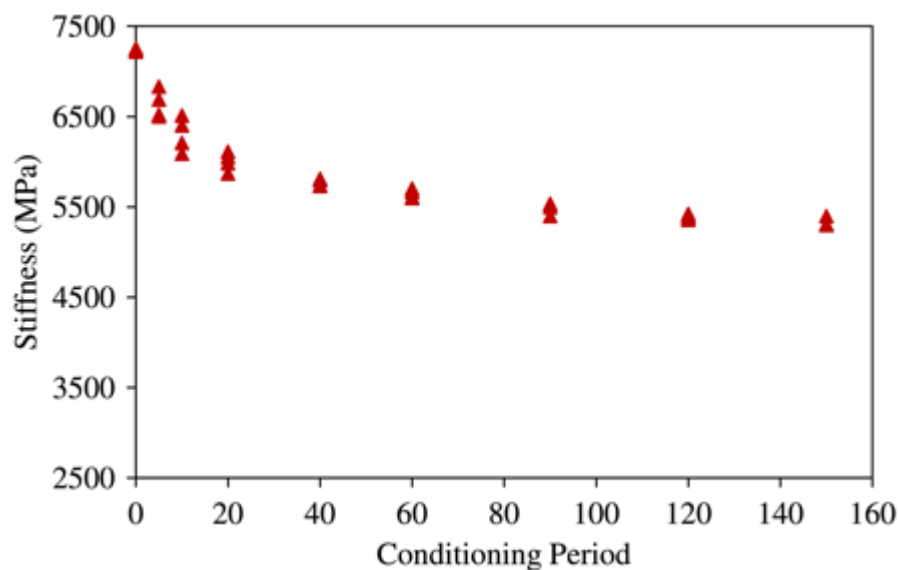


Figura 30. Disminución de la rigidez con el número de ciclos de hielo-deshielo.

Fuente: Islam, M. R. et Tarefder R. A. (2016) [20].

Tarefder, R. et al. (2018) [39] realizaron una investigación en la que una mezcla tipo AC se sometía a ciclos de hielo-deshielo (5, 10, 15 y 20) con el objeto de conocer su resistencia a tracción indirecta, su rigidez y su durabilidad a través del ensayo de fatiga. Así mismo, también realizaron las mismas series de ciclos de hielo-deshielo únicamente al ligante asfáltico. Sus resultados indican que, si bien aparece una pequeña tendencia a la disminución en los valores de resistencia a tracción indirecta conforme aumenta el número de ciclos, ésta no es significativa (Figura 31). Por el contrario, sí que se aprecia una pérdida significativa en la rigidez y durabilidad conforme se aumenta el número de ciclos. Estos resultados corroboraban los obtenidos dos años atrás. También observaron que el ligante pierde rigidez cuando el número de ciclos incrementa.

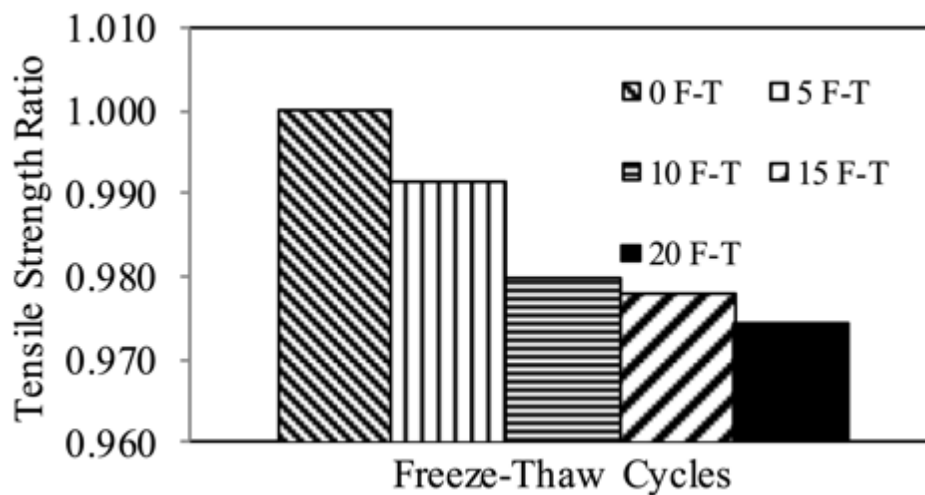


Figura 31. Sensibilidad al agua en función de los ciclos de hielo-deshielo.

Fuente Tarefder, R. et al. (2018) [39].

Teltayev, B. B. et al. (2019) [40] también estudiaron la influencia que tienen los ciclos de hielo-deshielo sobre distintos tipos de betún convencional y modificado, así como sobre una mezcla SMA-20. Para ello sometieron los distintos tipos de muestra a 25 y 50 ciclos de hielo-deshielo del tipo 4 horas a -18 °C y otras 4 horas a 20 °C. Al contrario que en el estudio de Tarefder, R. et al. del 2018 [39], Teltayev, B. B. et al. [40] observaron un aumento en la rigidez de los betunes conforme aumentaba el número de ciclos de hielo-deshielo. Por lo que, al igual que Özgan, E. et Serin, S. [33], indicaron que es importante considerar las solicitaciones a este tipo de ciclos a la hora de diseñar las mezclas bituminosas. En cuanto a los resultados sobre la mezcla SMA antes y después de los ciclos de hielo-deshielo, en el ensayo de resistencia a tracción indirecta obtuvieron una reducción de la resistencia tras los ciclos para todos los tipos de betún, alcanzado incluso descensos de un 48 %. En el ensayo de rodadura sin embargo, sólo el betún convencional tuvo como resultado una huella más profunda tras

50 ciclos de hielo-deshielo, el resto de betunes lograron alcanzar menores profundidades de huella tras los ciclos (Figura 32).

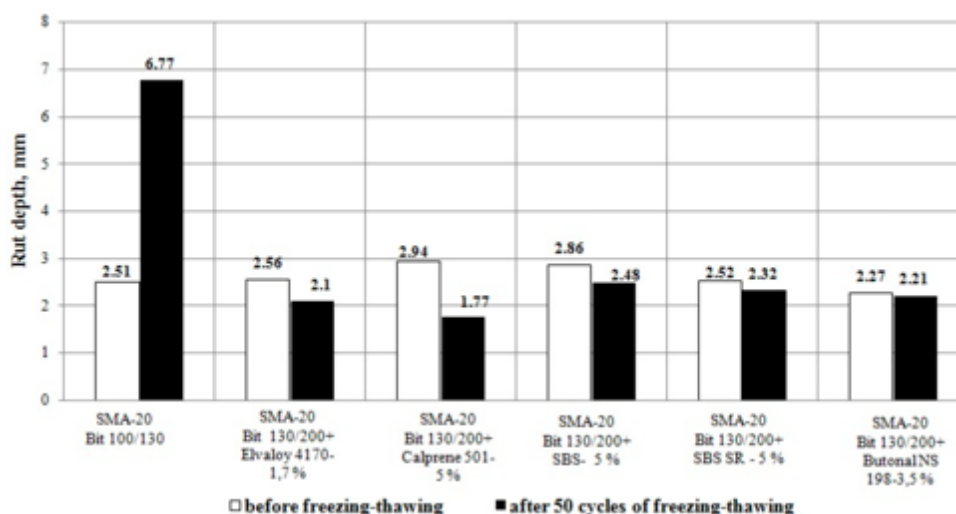


Figura 32. Resultados de profundidad de huella antes y después de 50 ciclos de hielo-deshielo.
Fuente: Teltayev, B. B. et al. (2019) [40].

2.2.3. Patologías de las mezclas bituminosas

Para que la vida útil de un firme sea adecuada, en el diseño del firme han de tenerse en cuenta multitud de factores. Éstos pueden dividirse en dos grandes grupos: pasivos y activos. Los factores pasivos, denominados así debido a que dependen exclusivamente de las propiedades intrínsecas del firme son, entre otros: el espesor de las diferentes capas, los materiales elegidos, el proceso de fabricación o la puesta en obra. Los factores activos son por su parte aquellos que dependen de variables externas al propio firme. El volumen e intensidad de tráfico de vehículos ligeros y pesados y la climatología se encuadran dentro de esta categoría. La radiación solar, las temperaturas máximas y mínimas, el efecto del agua, la nieve o el hielo, así como el de los fundentes que se emplean para combatir este último son factores que influyen decisivamente en la durabilidad de los firmes.

La acción del tráfico y la climatología generan tensiones sobre las distintas capas que conforman el paquete de firmes. Según Tino, R. (2015) [41] estas tensiones pueden agruparse en tensiones perpendiculares y tensiones tangenciales, siendo las tangenciales aquellas en las que el firme, y en especial sus capas superiores tienen una mayor responsabilidad. Estas tensiones son absorbidas y transmitidas por el pavimento en función de los materiales y procesos de fabricación y constructivos del propio firme. Mientras se mantiene el comportamiento elástico de la mezcla bituminosa, una vez que cesa el fenómeno que genera las tensiones, el firme recupera la deformación que se ha producido.

Sin embargo, la repetición de cargas genera la fatiga del firme y por consiguiente, que una parte de dichas deformaciones pase a ser plástica, lo que conlleva tanto la pérdida de sus principales propiedades originales, como el agotamiento de su capacidad de soporte.

Costa, A. [7] definió como patología de un firme la pérdida de alguna de sus propiedades, de tal manera que afecte a la comodidad y seguridad de los usuarios, así como a las características resistentes del firme, disminuyendo la vida de servicio del mismo.

Entre las patologías que puede sufrir una mezcla bituminosa ante la acción de la sal, el agua, el hielo o gradientes de temperatura elevados destacan las siguientes (Vega, Á. et Calzada, M.Á. [71]):

2.2.3.1. Deformaciones

Las deformaciones debidas a burbujas o protuberancias, hinchamientos localizados en la calzada en forma de ampolla (Figura 33 y Figura 34), pueden ser producidas por presiones de vapor de agua o aire, así como por la acción del hielo.

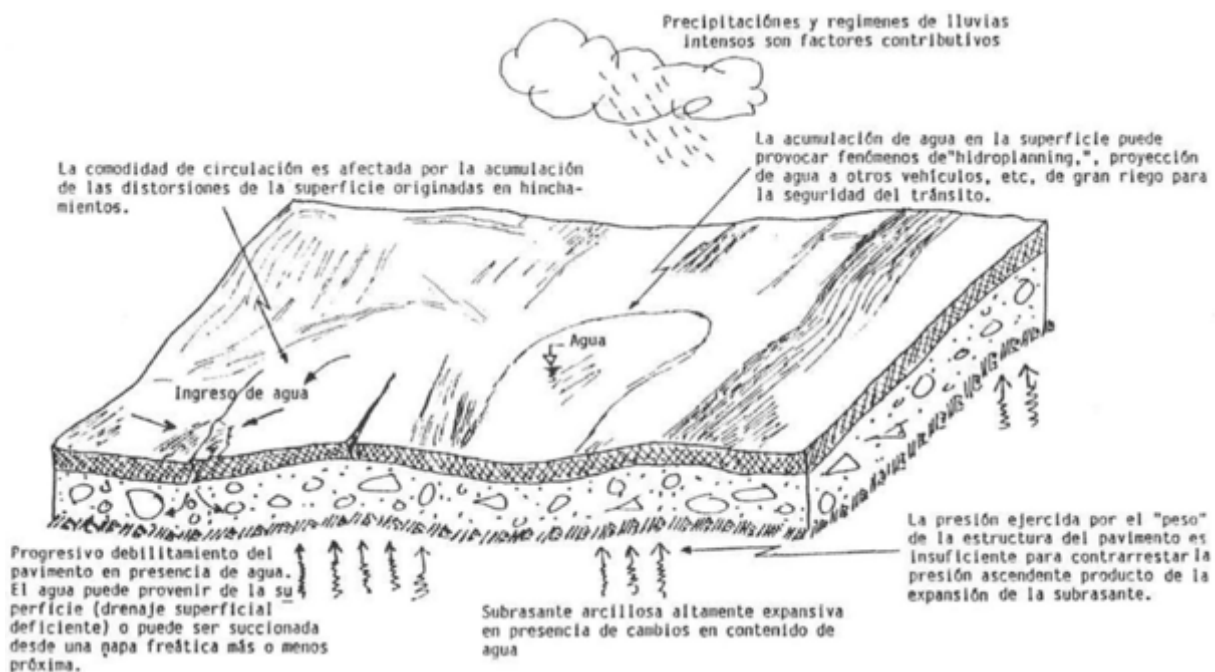


Figura 33. Esquema deformaciones por hinchamiento.

Fuente: Identificación de Fallas en Pavimentos y Técnicas de Reparación [18].



Figura 34. Hinchamiento.

Fuente: Identificación de Fallas en Pavimentos y Técnicas de Reparación [18].

El suelo que se encuentra debajo de las capas de mezcla bituminosa puede verse saturado por agua procedente del deshielo. Esta saturación de agua puede producir un debilitamiento en la capacidad de soporte que genere la aparición de hundimientos que se acaben reflejando en deformaciones en las capas superficiales del firme.

2.2.3.2. Roturas

Una de las patologías típicas en los firmes flexibles es la aparición de roturas. Existen diversos tipos de roturas y algunas de ellas pueden ser debidas a la retracción térmica de la capa de rodadura o a la acción del hielo.

La contracción y dilatación que experimentan los materiales susceptibles a las variaciones térmicas, como es el caso del betún, genera una serie de tensiones en las capas superiores del firme que producen la aparición de grietas transversales (Figura 35) y la aparición de pequeñas y finas fisuras superficiales (cuarteo de malla fina).

También se originan roturas debido al aumento de volumen que genera el agua al congelarse en las capas sobre las que apoya la mezcla bituminosa. Este hecho sucede con mayor facilidad en los suelos que tienen una mayor cantidad de partículas finas, ya que este tipo de partículas son mas susceptibles a la helada. Los tipos de rotura habituales debido a esta circunstancia son las líneas de rotura en forma

de zig-zag, normalmente siguiendo una dirección longitudinal (grieta errática) y líneas de rotura en el borde del pavimento (grietas en el borde de la calzada).

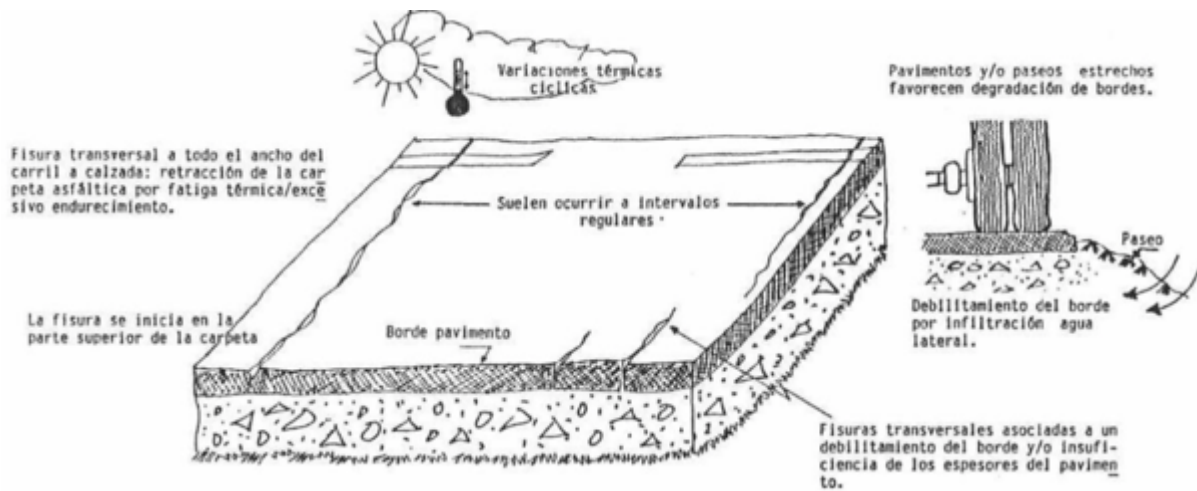


Figura 35. Esquema grieta transversal.

Fuente: Identificación de Fallas en Pavimentos y Técnicas de Reparación [18].

2.2.3.3. Desprendimientos

Como se ha mencionado anteriormente, las propiedades intrínsecas de los áridos y del betún empleados en la fabricación de la mezcla bituminosa, así como el propio proceso de fabricación de la mezcla determinan en gran medida que, tanto la envuelta como la adhesividad árido-ligante sea la correcta y por lo tanto se asegure una adecuada durabilidad del firme. El uso de aditivos anticongelantes puede producir que la adhesividad entre árido y ligante se vea reducida.

Cuando se originan problemas debidos a la envuelta o la adhesividad es habitual que se presente una patología en los firmes denominada desprendimiento. En un primer estadio surgen las descarnaduras, aparición sobre la superficie de rodadura de zonas parcialmente descarnadas por el arranque de gravilla (Figura 36). Si la situación se mantiene a lo largo del tiempo, puede dar lugar a la desintegración, descomposición del firme por pérdida progresiva del material de la calzada (Figura 37).



Figura 36. Descarnadura.
Fuente: Giganto, T. [14].

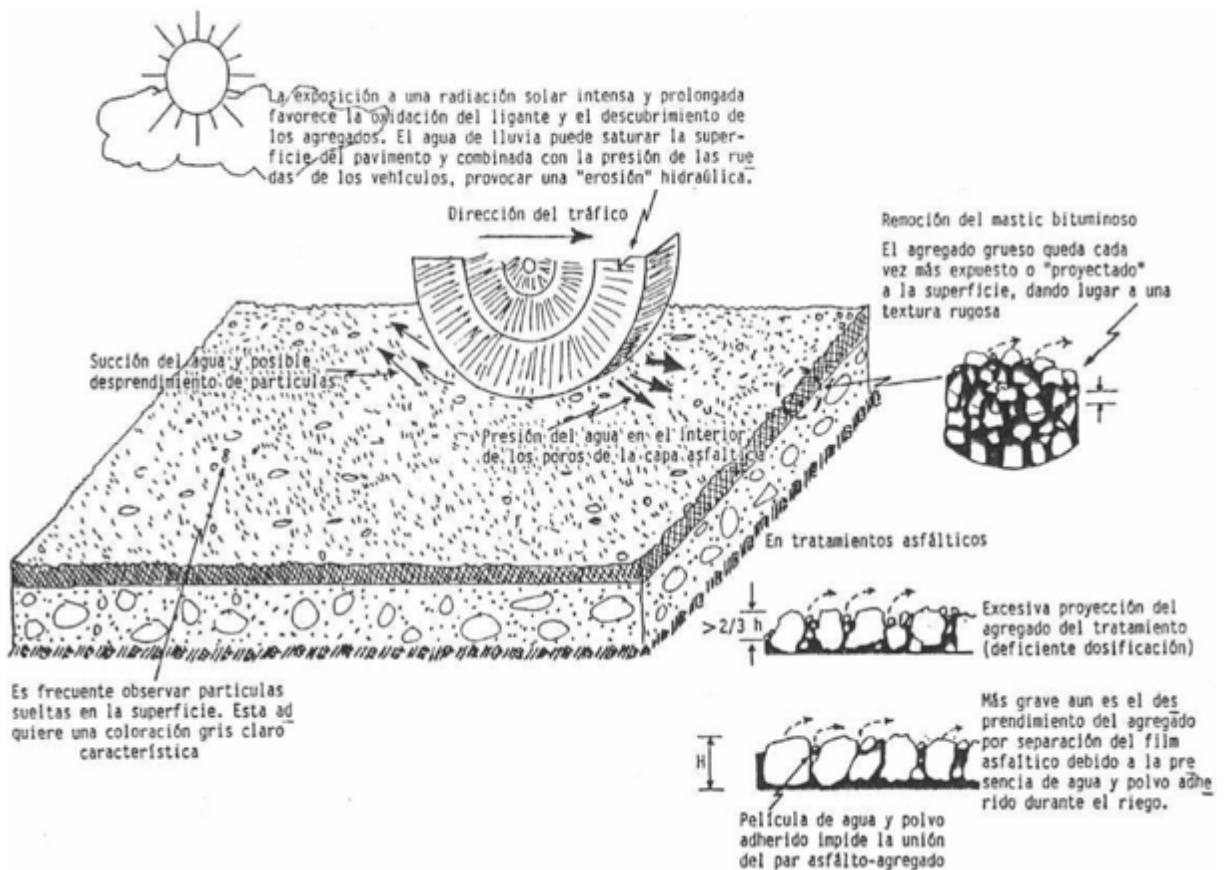


Figura 37. Esquema desprendimientos.
Fuente: Identificación de Fallas en Pavimentos y Técnicas de Reparación [18].

CAPÍTULO 3: MATERIALES

3.1. ÁRIDOS

En las mezclas bituminosas, la capacidad de soporte y la resistencia a la deformación dependen principalmente del rozamiento interno del esqueleto mineral que proporciona el árido.

El árido se divide en tres fracciones en función de su tamaño: árido grueso, árido fino y polvo mineral (filler). Además del tamaño, influye en las características del árido: su tipo, su granulometría, su peso específico y la proporción de huecos en el material compactado.

Las propiedades que requieren los áridos para mezclas bituminosas aparecen recogidas en la norma UNE-EN 13043 [61].



*Figura 38. Tamizadora pequeña para la obtención de los tamaños menores.
Fuente: Elaboración propia.*

En esta Tesis Doctoral, para la obtención de cada fracción de árido se tamizaron (Figura 38) y posteriormente se lavaron todos los áridos para eliminar el contenido de finos en los tamaños superiores (Figura 39).



*Figura 39. Lavado del árido.
Fuente: Elaboración propia.*

3.1.1. Árido grueso

Es la fracción de árido compuesta por las partículas de un tamaño mayor, por encima de 2 mm. (Figura 40).



Figura 40. Árido grueso ofítico dividido en fracciones.
Fuente: Elaboración propia.

Al árido grueso se le exigen propiedades relativas a su forma, buena resistencia al pulimento y el desgaste.

Para los tipos de mezcla estudiados, se ha empleado un árido grueso ofítico, ya que se trata de un material especialmente adecuado para su empleo en capas de rodadura en mezclas bituminosas. Esto es debido a que su resistencia al pulimento elevada hace que su textura superficial sea idónea durante un amplio periodo de tiempo, incluso bajo el influjo de tráfico intensos.

Este árido es obtenido de OFITAS DE SAN FELICES, S.A. en Haro (La Rioja), y sus prestaciones son las que aparecen en la Tabla 3, Tabla 4, Tabla 5 y Tabla 6.

Características esenciales	Norma UNE	Prestaciones
Tamaño de las partículas	EN 933-2 [65]	0/6,3
Granulometría	EN 933-2 [65]	G _A 90
Densidad de las partículas	EN 1097-6 [44]	2,93 Mg/m ³
Absorción de agua	EN 1097-6 [44]	0,1 %WA
Limpieza. Contenido de finos	EN 933-8 [68]	f ₁₆
Limpieza. Calidad de los finos: Azul de metileno	EN 933-9 [69]	MB _F 10

Tabla 3. Prestaciones acopio 0/6,3.
Fuente: OFITAS DE SAN FELICES, S.A.

Características esenciales	Norma UNE	Prestaciones
Tamaño de las partículas	EN 933-2 [65]	4/12,5
Granulometría	EN 933-2 [65]	G _C 90/15
Forma del árido grueso	EN 933-3 [66]	Fl ₂₀
Densidad de las partículas	EN 1097-6 [44]	2,95 Mg/m ³
Absorción de agua	EN 1097-6 [44]	0,9 %WA
Limpieza. Contenido de finos	EN 933-1 [64]	f _{0,5}
Porcentaje de caras trituradas o fracturadas	EN 933-5 [67]	C _{100/0}
Resistencia a la fragmentación	EN 1097-2 [43]	LA ₁₅
Resistencia al pulimento	EN 1097-8 [45]	PSV ₅₆

Tabla 4. Prestaciones acopio 4/12,5.
Fuente: OFITAS DE SAN FELICES, S.A.

Características esenciales	Norma UNE	Prestaciones
Tamaño de las partículas	EN 933-2 [65]	12,5/20
Granulometría	EN 933-2 [65]	G _C 85/35
Forma del árido grueso	EN 933-3 [66]	Fl ₂₀
Densidad de las partículas	EN 1097-6 [44]	2,96 Mg/m ³
Absorción de agua	EN 1097-6 [44]	0,5 %WA
Limpieza. Contenido de finos	EN 933-1 [64]	f _{0,5}
Porcentaje de caras trituradas o fracturadas	EN 933-5 [67]	C _{100/0}
Resistencia a la fragmentación	EN 1097-2 [43]	LA ₁₅
Resistencia al pulimento	EN 1097-8 [45]	PSV ₅₆

Tabla 5. Prestaciones acopio 12,5/20.
Fuente: OFITAS DE SAN FELICES, S.A.

Características esenciales	Norma UNE	Prestaciones
Tamaño de las partículas	EN 933-2 [65]	16/31,5
Granulometría	EN 933-2 [65]	G _C 90/10
Forma del árido grueso	EN 933-3 [66]	Fl ₁₅
Densidad de las partículas	EN 1097-6 [44]	2,94 Mg/m ³
Absorción de agua	EN 1097-6 [44]	0,4 %WA
Limpieza. Contenido de finos	EN 933-1 [64]	f _{0,5}
Porcentaje de caras trituradas o fracturadas	EN 933-5 [67]	C _{100/0}
Resistencia a la fragmentación	EN 1097-2 [43]	LA ₁₅
Resistencia al pulimento	EN 1097-8 [45]	PSV ₅₆

Tabla 6. Prestaciones acopio 16/31,5.
Fuente: OFITAS DE SAN FELICES, S.A.

3.1.2. Árido fino

Consta de los tamaños de árido que pasa por el tamiz de 2 mm y es retenido por el de 63 μm .

El árido fino debe estar exento de materia orgánica que pueda producir problemas en la adhesividad con los ligantes hidrocarbonados. La función del árido fino será la de completar el huso granulométrico en las fracciones en las que el árido grueso no es capaz. Debido a la naturaleza de cada una de las mezclas, tendrá más cantidad de finos la mezcla cerrada que la mezcla porosa.

Al igual que en el caso del árido grueso, tanto para la mezcla AC como para la mezcla PA se emplea árido ofítico (Figura 41), debido a las propiedades antes expuestas.

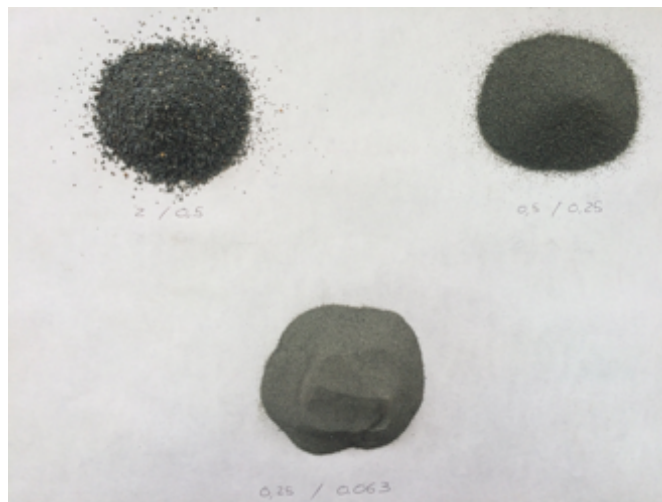


Figura 41. Árido fino ofítico dividido en fracciones.
Fuente: Elaboración propia.

El árido fino también fue proporcionado por OFITAS DE SAN FELICES, S.A. y sus características se muestran en la Tabla 7.

Características esenciales	Norma UNE	Prestaciones
Tamaño de las partículas	EN 933-2 [65]	0/2
Granulometría	EN 933-2 [65]	G _F 85
Densidad de las partículas	EN 1097-6 [44]	2,97 Mg/m ³
Absorción de agua	EN 1097-6 [44]	0,2 %WA
Limpieza. Contenido de finos	EN 933-8 [68]	f ₂₂
Limpieza. Calidad de los finos: Azul de metileno	EN 933-9 [69]	MB _F 10

Tabla 7. Prestaciones acopio 0/2.
Fuente: OFITAS DE SAN FELICES, S.A.

3.1.3. Polvo mineral (filler)

El polvo mineral es la fracción de árido que pasa por el tamiz 63 μm .

Debido a su elevada superficie específica tiene un valor capital en el comportamiento de las mezclas bituminosas según su naturaleza, finura, actividad y la proporción con respecto a la mezcla.

Para los dos tipos de mezcla que contempla esta tesis se emplea filler calizo de aportación. La utilización de este tipo de polvo mineral es debido a que la caliza es un material de carácter básico que da pocos problemas de adhesividad. El árido grueso y fino al ser ofítico resulta ser ácido y puede causar problemas de adhesividad. Al añadir filler calizo se soluciona dicho problema, ya que la adhesividad de los áridos mejorará (Figura 42).



Figura 42. Polvo mineral calizo.
Fuente: Elaboración propia.

El polvo mineral se obtuvo de EMILIO BOLADO, S.L.. Las características del filler aparecen descritas en la Tabla 8.

Ensayo	Método de ensayo	Especificación PG-3	Filler Calizo
Densidad aparente en tolueno	NLT-176/74 [27]	0,5 - 0,8 Mg/m^3	0,71 Mg/m^3
Densidad aparente en queroseno	-	0,5 - 0,8 Mg/m^3	0,62 Mg/m^3
Peso específico	NLT-155/63 [26]	-	2,753 Mg/m^3
Huecos filler compactado seco	NLT-177/94 [28]	-	36,4 %

Tabla 8. Características del polvo mineral.
Fuente: Elaboración propia.

3.2. LIGANTES HIDROCARBONADOS

En carreteras, los ligantes hidrocarbonados asfálticos son los más empleados. Usualmente son un subproducto de la destilación del crudo que llega de las refinerías, si bien es cierto que existen instalaciones en las que el producto final que se busca es el ligante asfáltico.

Para esta tesis se emplearon dos tipos de betunes, un betún convencional 50/70 (Figura 43) y un betún modificado con polímeros PMB 45/80-65. Donde cada uno de los dos primeros números separados por la barra inclinada a la derecha (/) hacen referencia respectivamente al valor mínimo y máximo de la penetración expresado en décimas de milímetro. El tercer valor que aparece en el betún modificado con polímeros precedido de un guion (-) representa el valor mínimo del punto de reblandecimiento. La elección de ambos tipos de betún se debe a que los dos tipos de ligante son ampliamente empleados en España, el betún 50/70 para mezclas de hormigón bituminoso y el betún PMB 45/80-65 para mezclas porosas. Las principales características de los betunes empleados en esta tesis aparecen recogidas en la Tabla 9.

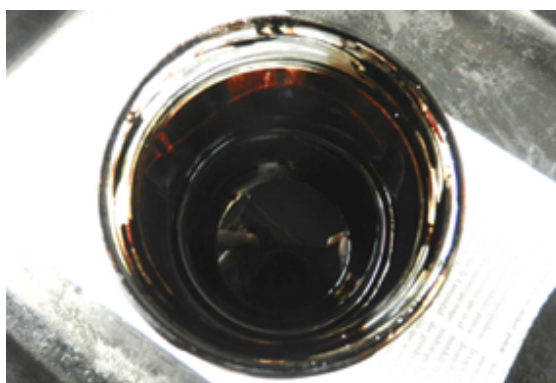


Figura 43. Betún 50/70 a 150 °C.
Fuente: Elaboración propia.

Características	Unidad	Norma UNE	50/70	PMB 45/80-65
Penetración (25 °C; 100 g; 5 s)	0,1 mm	EN 1426	65,0	49,5
Punto de reblandecimiento	°C	EN 1427	47,2	72,3
Punto de fragilidad Frass	°C	EN 12593	-9	-13
Índice de penetración	-	EN 12591 Anexo A	-1,3	-

Tabla 9. Características de los betunes empleados.
Fuente: Elaboración propia.

Ambos betunes aparecen recogidos en el PG-3 [34] en los artículos 542 y 543. El betún 50/70 aparece recogido en la Tabla 542.1.a (Tabla 10) como un ligante hidrocarbonado a emplear en capas de rodadura y siguientes de mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón bituminoso para cualquier categoría de tráfico pesado, incluido el T0 y T00 para zonas térmicas estivales templadas. Este betún aparece también recogido en la Tabla 543.1 (Tabla 11) como tipo de ligante a emplear en mezclas drenantes y discontinuas para categorías de tráfico pesado T2 e inferiores. Por otro lado, el betún PMB 45/80-65 aparece en la Tabla 543.1 (Tabla 11) como ligante a emplear en mezclas drenantes y discontinuas para cualquier categoría de tráfico pesado.

Zona térmica estival	Categoría de tráfico pesado					
	T00	T0	T1	T2 y T31	T32 y arcenes	T4
Cálida	35/50 BC 35/50 PMB 25/55-65 PMB 45/80-65		35/50 BC 35/50 PMB 25/55-65 PMB 45/80-60 PMB 45/80-65	35/50 50/70 BC 35/50 BC 50/70 PMB 45/80-60	50/70 BC 50/70	
Media	35/50 BC 35/50 PMB 45/80-60 PMB 45/80-65		35/50 50/70 BC 35/50 BC 50/70 PMB 45/80-60	50/70 BC 50/70 PMB 45/80-60	50/70 70/100 BC 50/70	50/70 70/100 BC 50/70
Templada	35/50 BC 35/50 PMB 45/80-60 PMB 45/80-65		50/70 70/100 BC 50/70 PMB 45/80-60			

Tabla 10. Tipo de ligante a emplear en hormigón bituminoso para capa de rodadura y siguiente.
Fuente: PG-3 [34].

Tipo de mezcla	Categoría de tráfico pesado				
	T00 y T0	T1	T2 y T31	T32 y arcenes	T4
Discontinua	PMB 45/80-65	PMB 45/80-65 PMB 45/80-60	PMB 45/80-60 50/70 BC 50/70	50/70 70/100 BC 50/70	
Drenante	PMB 45/80-65	PMB 45/80-65 PMB 45/80-60	PMB 45/80-60 50/70 BC 50/70	50/70 70/100 BC 50/70	

Tabla 11. Tipo de ligante a emplear en mezclas drenantes y discontinuas.
Fuente: PG-3 [34].

3.3. SAL

La sal empleada en esta tesis se trata de cloruro sódico (NaCl) (Figura 44), un compuesto cristalino formado por un átomo de sodio (Na) y uno de cloro (Cl).



Figura 44. Cloruro sódico (NaCl).
Fuente: Elaboración propia.

La sal empleada para esta investigación fue SAL MARINA de CASA SANTIVERI, S.L.. Se trata de una sal no purificada, ni secada, obtenida por evaporación natural (sol).

La densidad de esta sal es de $2,165 \text{ g/cm}^3$. Su granulometría aparece en la Figura 45.

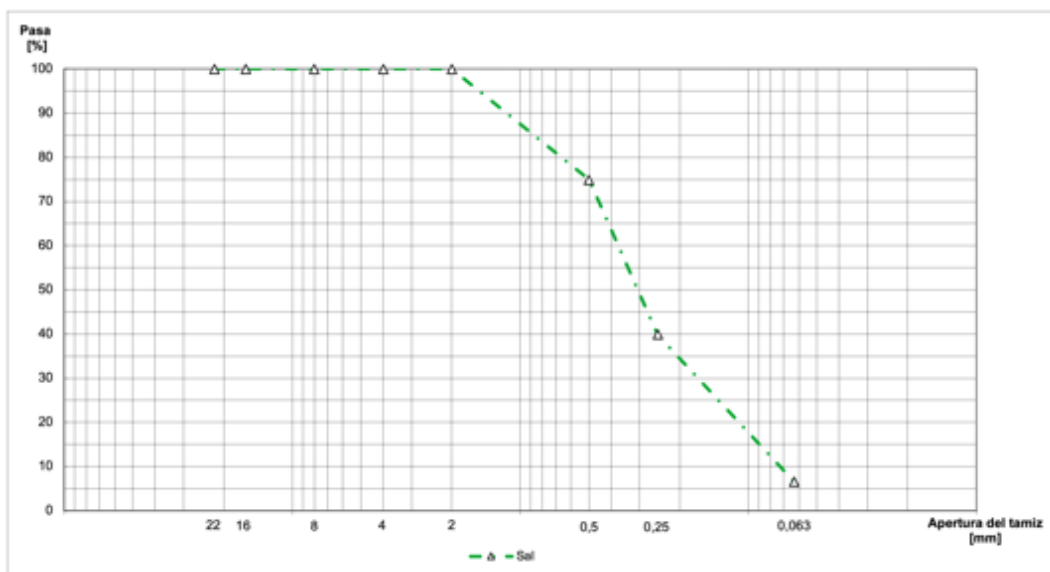


Figura 45. Granulometría de la sal empleada.
Fuente: Elaboración propia.

3.4. AGUA DESTILADA

Por agua destilada se entiende la sustancia que se basa para su composición en moléculas de H_2O y que ha sido limpiada mediante destilación.

El agua destilada que se ha empleado en la preparación de alguna de las series de probetas en esta Tesis Doctoral ha sido proporcionada por el Laboratorio de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDSlab) (Figura 46).



*Figura 46. Aparato empleado para la destilación de agua en SUDSlab.
Fuente: Elaboración propia.*

3.5. AGUA DE MAR

El agua de mar es una disolución de muy diversas sustancias en H_2O . Si bien una gran cantidad de elementos químicos naturales se encuentran presentes en la composición del agua de mar, la gran mayoría sólo forma parte como trazas. La gran parte de la composición de los solutos es formada por Cl^- y Na^+ .

El agua de mar que se utilizó en esta tesis fue facilitada por el Museo Marítimo del Cantábrico (Figura 47). Se trata de agua de la Bahía de Santander y se proporcionó filtrada por un tamiz de apertura $50\ \mu m$. Poseía una concentración de sal del 3,5 % y una conductividad eléctrica de 4,93 S/m a $19,1\ ^\circ C$.



*Figura 47. Museo Marítimo del Cantábrico.
Fuente: Elaboración propia.*

3.6. DISEÑO DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS

En esta tesis se estudiarán dos tipos de mezcla, una AC-16 Surf D (mezcla cerrada) y una PA-16 (mezcla porosa). Ambas aparecen recogidas en los artículos 542 y 543 del PG-3 [34] respectivamente.

3.6.1. AC – 16 Surf D

La granulometría de las mezclas empleada en esta investigación se ajustó al centro del huso granulométrico y aparece en la Figura 48

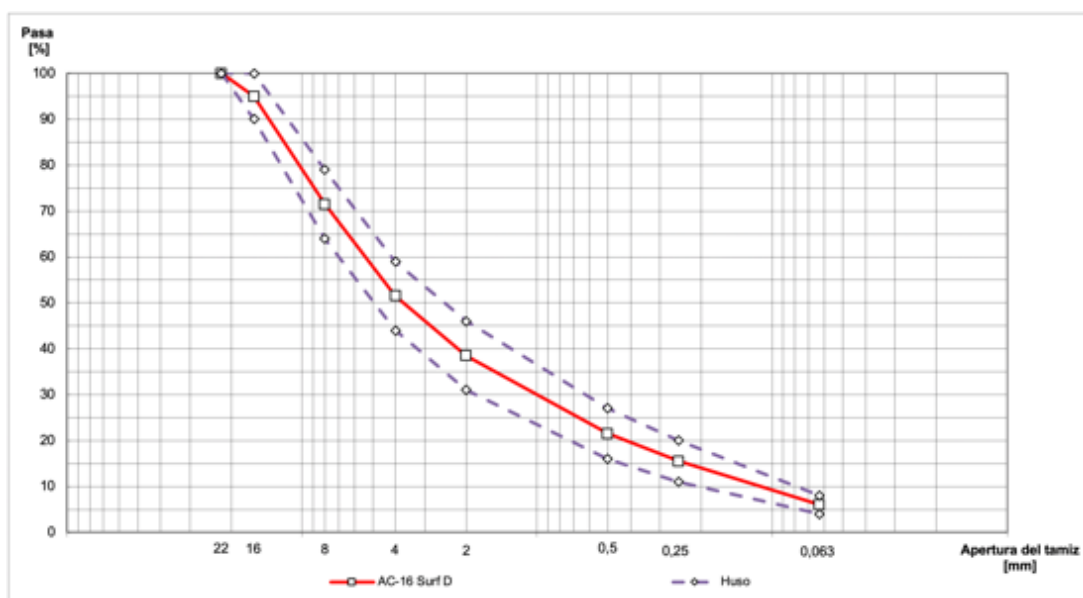


Figura 48. Granulometría de la mezcla AC-16 Surf D.
Fuente: Elaboración propia.

Para determinar este contenido óptimo de ligante se empleó el Método Marshall (*UNE-EN 12697-34*) [56] (Tabla 12). Se trabajó juntamente con las gráficas que reflejan los huecos en mezcla y los huecos en árido en relación con la proporción de betún sobre la mezcla. El PG-3 indica en la Tabla 542.10 del Artículo 542.3 que la dotación mínima de betún sobre mezcla que debe tener una mezcla densa en una capa de rodadura es del 4,5 %. En ese mismo artículo también se indica que, en caso de que las partículas de los áridos empleados en la fabricación de la mezcla tengan una densidad diferente a $2,65 \text{ g/cm}^3$, ha de aplicarse un factor del tipo $\alpha = \frac{2,65}{\rho_d}$. Donde, ρ_d es la densidad de las partículas de los áridos empleados. Las partículas de los áridos empleados en esta Tesis Doctoral tienen en su conjunto una densidad de $2,921 \text{ g/cm}^3$. Por todo esto, la dotación mínima de betún sobre mezcla que establece el PG-3 para este caso es un 4,08 %.

Betún sobre mezcla	%	4,5	4,75	5	5,25
Densidad	gr/cm ³	2,516	2,531	2,539	2,556
Huecos en mezcla	%	6,8	5,8	5,1	4,1
Huecos en áridos	%	17,7	17,5	17,4	17,1

Tabla 12. Resultados para la dotación de ligante en la mezcla AC-16 Surf D.
Fuente: Elaboración propia.

Para que se cumpliera la normativa correspondiente a mezclas que pueden permanecer en capas de rodadura, el porcentaje de huecos en mezcla debía estar entre el 4 % y el 6 % (Figura 49).

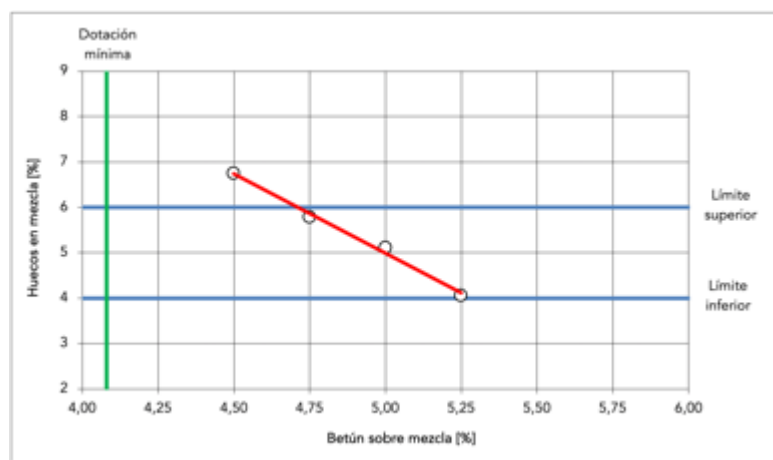


Figura 49. Huecos en mezcla de la mezcla AC-16 Surf D.
Fuente: Elaboración propia.

Se comprobó que se está en la rama descendente, o rama seca, de la curva de huecos en árido, así como que el porcentaje de huecos en árido era mayor o igual al 15 % (Figura 50).

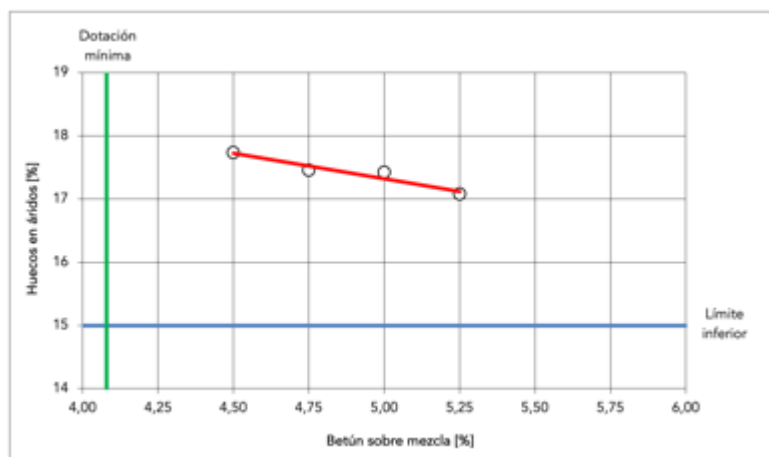


Figura 50. Huecos en árido de la mezcla AC-16 Surf D.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 51 se pueden apreciar las diferentes densidades que se alcanzaron para cada dotación de betún.

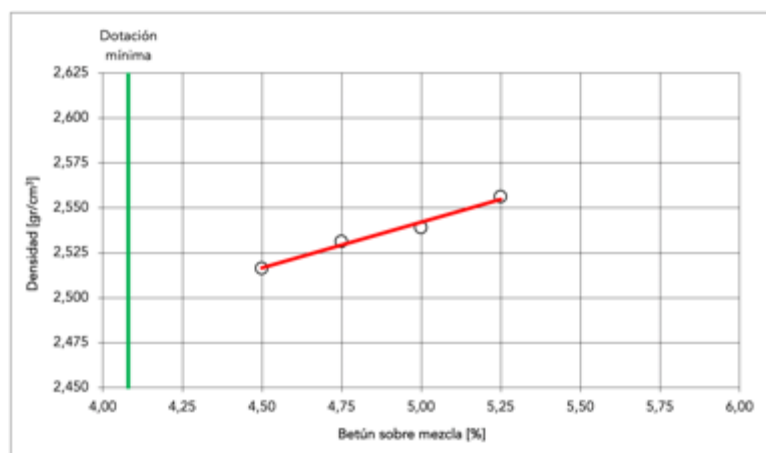


Figura 51. Densidad de la mezcla AC-16 Surf D.
Fuente: Elaboración propia.

Con los resultados obtenidos (Tabla 12, Figura 49 y Figura 50), se determinó que la dotación óptima de ligante sobre mezcla era de 5,00 %. Con esta dotación, la relación polvo mineral y betún sobre árido era de 1,14, que se encuentra próxima a las recomendadas por el PG-3 en su Tabla 542.11 (Tabla 13).

Tipo de capa	Zona térmica estival	
	Cálida y media	Templada
Rodadura	1,2	1,1
Intermedia	1,1	1,0
Base	1,0	0,9

Tabla 13. Relación filler-betún recomendable.
Fuente: PG-3 [34].

La fabricación de la mezcla AC-16 Surf D se realizó de manera general en laboratorio (UNE-EN 12697-35) [57], mezclando todos los componentes en una amasadora de eje vertical y rotación planetaria. En primer lugar, se introducía el árido (y la sal si correspondía) y el betún; se dejaba amasar durante un minuto y posteriormente se añadía el polvo mineral y se continuaba amasando durante tres minutos más.

En la Figura 52 aparece una imagen con las probetas que se emplearon para el Método Marshall.



Figura 52. Probetas empleadas para determinar el óptimo de betún.
Fuente: Elaboración propia.

Debido a que se disponía de una mezcla bituminosa fabricada en planta asfáltica que empleaba el mismo árido, granulometría y tipo y dosificación de betún, esta mezcla fabricada en planta fue utilizada en las probetas de mezcla AC-16 Surf D que se sometieron a los diferentes tratamientos térmicos.

3.6.2. PA – 16

La dotación de ligante que se ha empleado para estas mezclas es de 4,5 % de betún sobre mezcla.

La granulometría empleada en esta investigación para la mezcla PA-16 se ajustó al centro del huso granulométrico y aparece en la Figura 53.

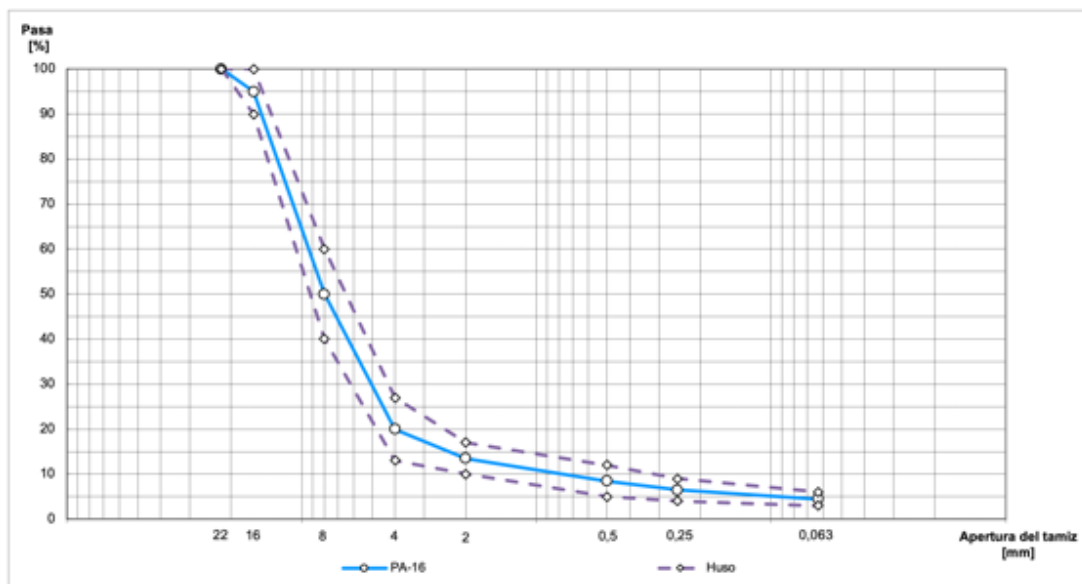


Figura 53. Granulometría de la mezcla PA-16.
Fuente elaboración propia.

Las probetas de mezcla PA-16, al igual que las de AC-16 Surf D, fueron fabricadas de manera general en laboratorio (Figura 54).



*Figura 54. Árido pesado y preparado para fabricar probetas de PA-16.
Fuente elaboración propia.*

Al igual que en el caso de la mezcla AC, se disponía de una mezcla bituminosa porosa con betún PMB 45/80-65 con características análogas a la fabricada en laboratorio. Por ese motivo, las series de PA-16 con betún PMB 45/80-65 que fueron sumergidas en agua salada, se fabricaron adicionalmente en planta asfáltica.

CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA

4.1. TRATAMIENTOS DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS CON LA SAL

La influencia de la sal en las mezclas bituminosas fue estudiada tanto para la mezcla AC-16 Surf D, como para la PA-16 mediante tres formas diferentes de incorporar la sal. Además, para cada tipo de mezcla bituminosa, ligante y método de fabricación se ensayó previamente una serie de referencia sin ningún tipo de interacción de sal.

4.1.1. Muestras sumergidas en agua salada

En este método se incluyen las probetas de mezcla fabricadas de manera habitual y luego envejecidas mediante su inmersión, durante un determinado tiempo, en agua con una concentración de sal y a una temperatura prefijada. El tiempo y temperatura en que las probetas permanecen sumergidas depende, en primer lugar, de los requerimientos del ensayo a los que va a verse sometida la mezcla y, en segundo lugar, a si va a verse sometida a algún tipo de interacción térmica previa al ensayo.

El procedimiento de preparación del agua con sal para las diferentes series de probetas, exceptuando la serie correspondiente al agua de mar, consiste en añadir la cantidad de sal requerida y mezclarla a temperatura ambiente hasta lograr que la sal se disuelva completamente (Figura 55).

Para la elección de la cantidad de sal en el agua se partió de la concentración de sal existente en el agua de mar y desde ese punto se incrementó dicha cantidad en dos ocasiones. Las concentraciones de sal finalmente empleadas aparecen en la Tabla 14.

Cantidad de sal por peso de agua (%)		Descripción
AC-16 Surf D	PA-16	
0	0	Agua destilada (Referencia)
3,5	3,5	Agua de mar
5	5	Sal añadida al agua destilada
10	10	Sal añadida al agua destilada

*Tabla 14. Series sumergidas en agua con sal.
Fuente: Elaboración propia.*

En el interior de los recipientes en los que permaneció la mezcla sumergida en agua con sal, se dispusieron unas superficies de plástico perforadas. Sobre estas superficies se apoyaron las probetas de manera que la disolución de agua y sal estuviese en contacto con toda la superficie de la probeta.

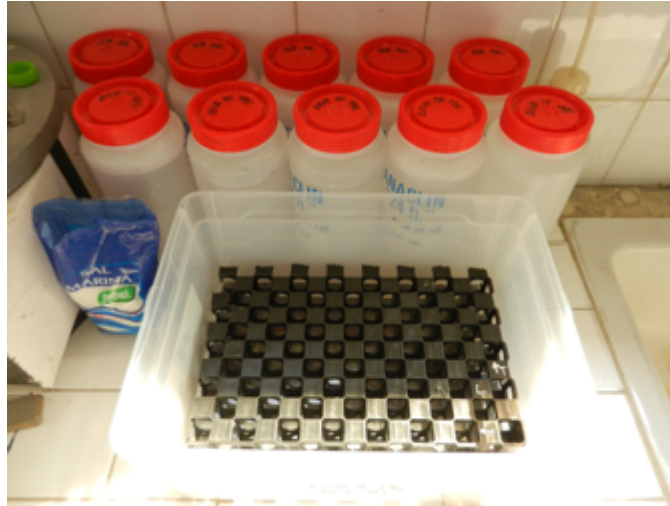


Figura 55. Al fondo recipientes con agua de mar y delante aquellos en los que se sumergían las probetas ya fabricadas.

Fuente elaboración propia.

4.1.2. Sal añadida a la mezcla como árido

En este tipo de interacción la sal se añade a la mezcla bituminosa a la hora de fabricar, como si se tratase de un árido más. Este método es muy similar al empleado por Giuliani, F. et al. (2012) [15], Zheng, M. et al. (2015) [73] o Liu, Z. et al. (2013) [23]. La sal es pesada (Figura 56) y posteriormente añadida en la amasadora al mismo tiempo que se añade el árido y el betún (Figura 57).

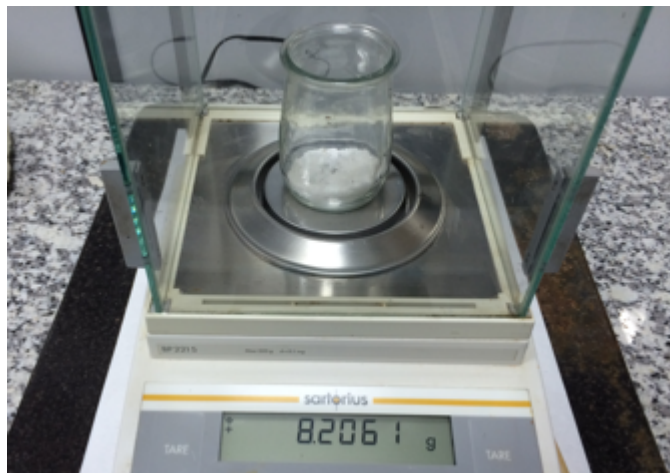


Figura 56. Sal pesada para su posterior adición a la mezcla.

Fuente: Elaboración propia.



*Figura 57. Momento en el que se añade la sal en la fabricación de las probetas.
Fuente elaboración propia.*

La cantidad de sal añadida en cada serie aparece recogida en la Tabla 15.

AC-16 Surf D		PA-16	
Cantidad de sal por peso de betún (%)	Cantidad de sal por peso de árido (%)	Cantidad de sal por peso de betún (%)	Cantidad de sal por peso de árido (%)
0	0	0	0
5	0,26	5	0,23
10	0,52	10	0,46
38	2	42,5	2
95	5	106	5

*Tabla 15. Series con sal añadida como árido.
Fuente: Elaboración propia.*

El motivo de que en las series con mayor cantidad de sal añadida los porcentajes sean diferentes en ambos tipos de mezcla, se debe a que estas series corresponden, respectivamente, a un 2 % y un 5 % de sal en función del peso total de los áridos. Y debido a que la proporción de árido-betún de las mezclas AC-16 Surf D y PA-16 no es la misma, tampoco son iguales los porcentajes de sal añadida en función de la cantidad de betún.

Por otra parte, se realizaron una serie de pruebas para ver cómo era el comportamiento de la sal en el betún, determinándose que no resulta miscible con el ligante ni siquiera triturando la sal (Figura 58 y Figura 59).



*Figura 58. Sal sin triturar en betún 50/70 antes y después de remover.
Fuente: Elaboración propia.*



*Figura 59. Sal triturada en betún 50/70 antes y después de remover.
Fuente: Elaboración propia.*

4.1.3. Árido saturado en agua con sal antes de emplearlo en la mezcla

Este tratamiento con sal consiste en sumergir en agua con una determinada cantidad de sal, el árido con el que va a fabricarse la mezcla bituminosa. El procedimiento para este tipo de interacción consistió en mantener sumergido en agua salada el árido durante setenta y dos (72) horas facilitando que las partículas de árido quedasen impregnadas de sal (Figura 60 y Figura 61), posteriormente secarlo y finalmente fabricar la mezcla con él.

El secado del árido se realizó en dos etapas:

1. Se extrae el agua del recipiente en el que ha estado tres días (Figura 62) y se introduce el árido, en el mismo recipiente de plástico, en una estufa a 60 °C durante un día.

2. Se traslada el árido a una bandeja de metal, que se introducirá en la estufa para que éste alcance su temperatura de fabricación.



Figura 60. Preparación del árido saturado en agua con sal antes de emplearlo en la fabricación de la mezcla.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 61. Agitación del árido en la disolución de agua salada para que esta disolución envuelva a todo el árido.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 62. Extracción del agua con sal tras tres días.

Fuente: Elaboración propia.

Se observó que, tras la ejecución de la primera fase del secado del material, aparecía en el recipiente y sobre los áridos, una costra de sal (Figura 63). Adicionalmente, en los casos con una concentración de sal en agua más elevada, también se pudo apreciar la formación de terrones de áridos con las partículas más finas (Figura 64).



*Figura 63. Costra de sal que aparece tras el secado del árido.
Fuente: Elaboración propia.*



*Figura 64. Terrón de árido tras el secado del mismo.
Fuente: Elaboración propia.*

Las concentraciones de sal en agua empleadas en este conjunto de series aparecen descritas en la Tabla 16.

Cantidad de sal por peso de agua (%)	
AC-16 Surf D	PA-16
0	0
2	2
3,5	3,5
5,0	5,0

*Tabla 16. Series con árido sumergido en agua con sal.
Fuente: Elaboración propia.*

4.2. INTERACCIÓN DE LA TEMPERATURA EN LAS MEZCLAS BITUMINOSAS

La influencia de tres tipos diferentes de interacción térmica sobre una mezcla bituminosa cerrada han sido analizados en esta investigación. A través de las distintas interacciones térmicas se caracterizó el envejecimiento que sufren las mezclas bituminosas en función de las condiciones climatológicas a las que pueden verse expuestas.

4.2.1. Temperatura constante

La primera de estas interacciones consistió en mantener la temperatura de las probetas controlada a 20 °C desde la finalización de su fabricación hasta el comienzo del procedimiento de cada ensayo. Estas probetas se realizaron a modo de referencia.

4.2.2. Ciclos de hielo-deshielo

En esta interacción térmica se sometió a la mezcla bituminosa a una serie de cinco ciclos de hielo-deshielo. Las temperaturas límite de estos ciclos son 38 °C como límite superior y -33 °C como límite inferior. Estas temperaturas fueron escogidas debido a que 38 °C es aproximadamente diez grados superior a la media de la temperatura del aire estival en Santander (España), y -33 °C es diez grados menor que el punto de congelación de una disolución de agua con sal.

Tres series de muestras fueron sometidas a este tratamiento térmico, una serie seca de referencia y dos series sumergidas en agua, una en agua destilada y otra en agua con un 5 % de sal.

Las temperaturas fueron medidas introduciendo un termo-sensor en el interior de las probetas en el momento de la fabricación de la mezcla bituminosa (Figura 65 y Figura 66). El procedimiento para introducir el termo-sensor dentro de la probeta consistió en, una vez que se iba rellenar el molde en el que se compactaba la probeta, verter únicamente la mitad de la masa total de la probeta, de manera que se pudiera colocar el extremo del termo-sensor en el centro de la misma. A continuación se vertió la otra mitad de la masa de la probeta para finalmente realizar la compactación.



*Figura 65. Termo-sensor dentro de las probetas.
Fuente: Elaboración propia.*



*Figura 66. Midiendo la temperatura interior de las probetas.
Fuente: Elaboración propia.*

Con este termo-sensor, fue posible determinar la temperatura interior de la probeta en cada instante (intervalo de medida de un minuto). Conociendo esto, el tiempo de cada ciclo de hielo-deshielo se estableció para que ambas fases, caliente y fría, tuvieran tiempo suficiente para alcanzar las temperaturas definidas. La serie seca alcanzó los 38 °C de manera estable a las 12 horas de haber sido introducida en la estufa. Las dos series sumergidas lograron esa misma temperatura tres horas más tarde, aproximadamente en la hora 15. En el caso de los -33 °C, al igual que en la fase caliente, la serie seca alcanzó la temperatura objetivo a las 12 horas; sin embargo, las dos series sumergidas lo hicieron 4 horas más tarde, pasadas 16 horas desde que se introdujeron en el congelador. De esta manera, cada ciclo de hielo-deshielo se definió de 48 horas, 24 horas en la estufa a 38 °C para la fase caliente y 24 horas en el congelador a -33 °C para la fase fría (Figura 67).

La temperatura registrada a lo largo de los cinco ciclos de hielo-deshielo aparece en la Figura 68.

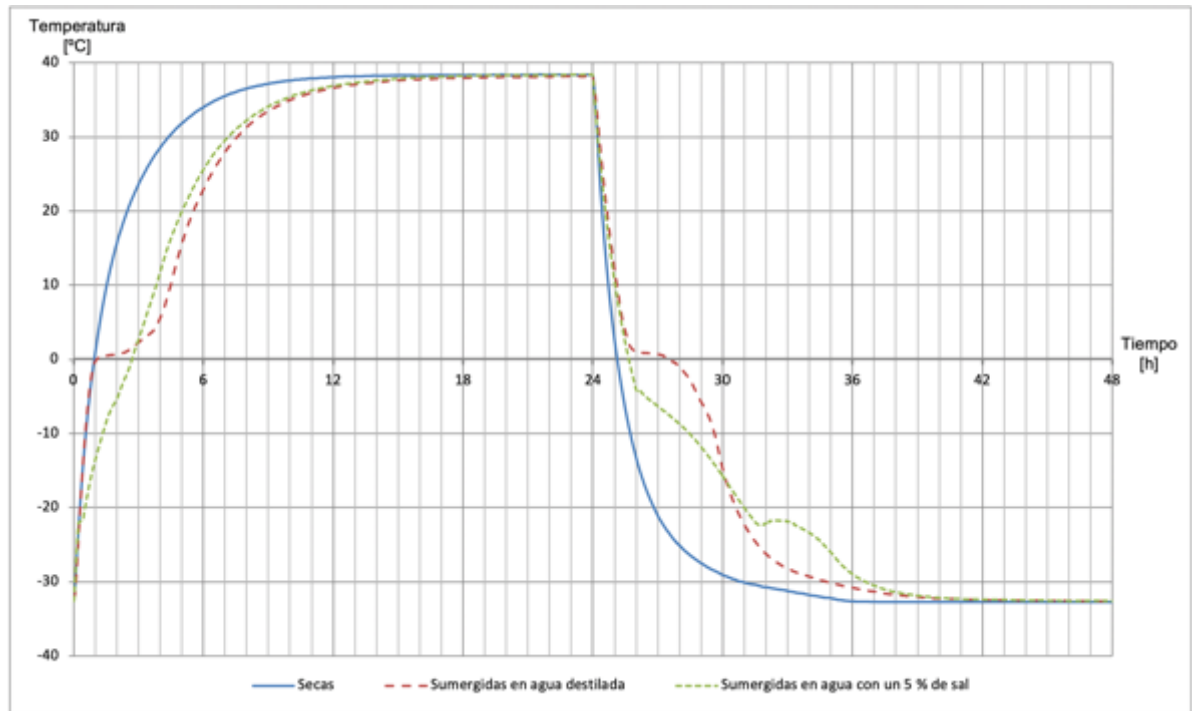


Figura 67. Temperatura en un ciclo de hielo-deshielo.
Fuente: Elaboración propia.

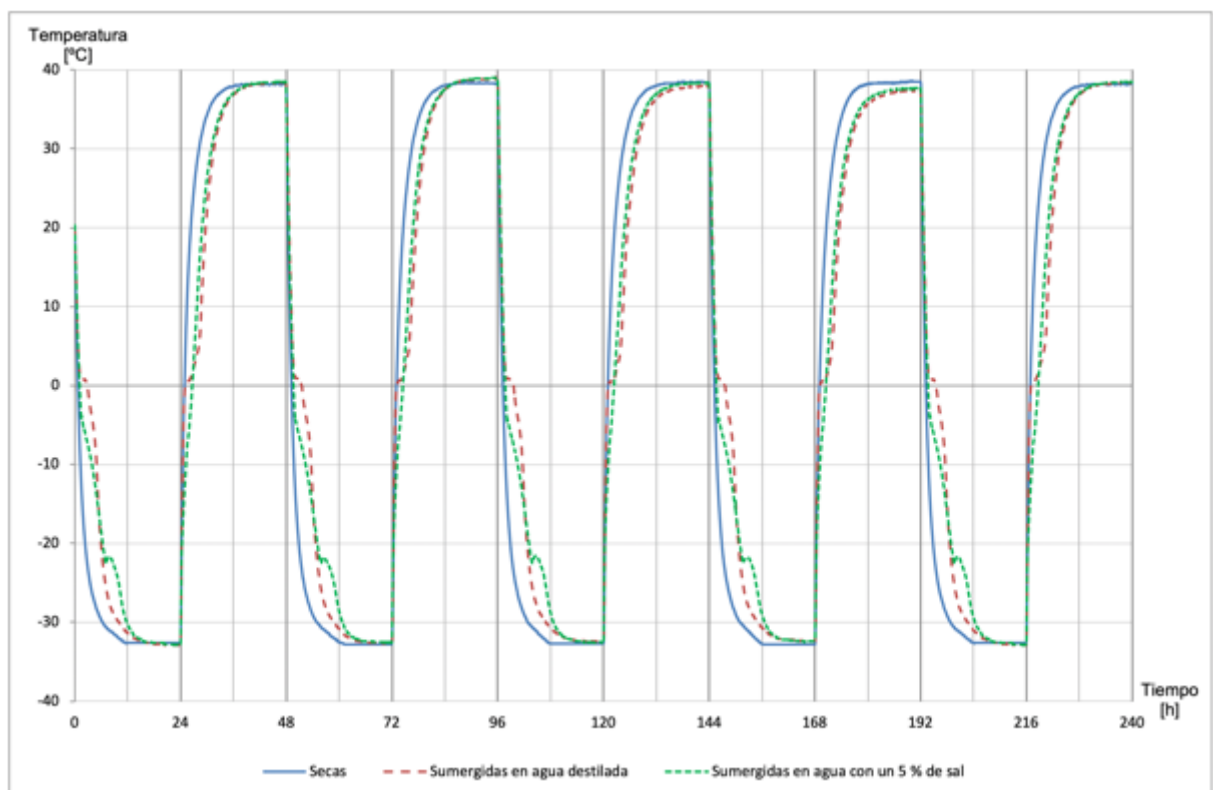


Figura 68. Temperatura cinco ciclos de hielo-deshielo.
Fuente: Elaboración propia.

El tiempo que cada conjunto de muestras sumergidas (en agua destilada y en agua con un 5 % de sal) estuvo en contacto con hielo queda definido por los peldaños de cambio de fase líquido-sólido y sólido-líquido. Estos peldaños se forman debido a que, durante el cambio de fase, la energía térmica se invierte en el propio cambio de fase y no en variaciones de temperatura. Para las muestras sumergidas en agua destilada, el tiempo en contacto con agua congelada es de 22 horas, mientras que, para las probetas sumergidas en agua con sal, este tiempo se reduce hasta las 15 horas aproximadamente (Figura 69).

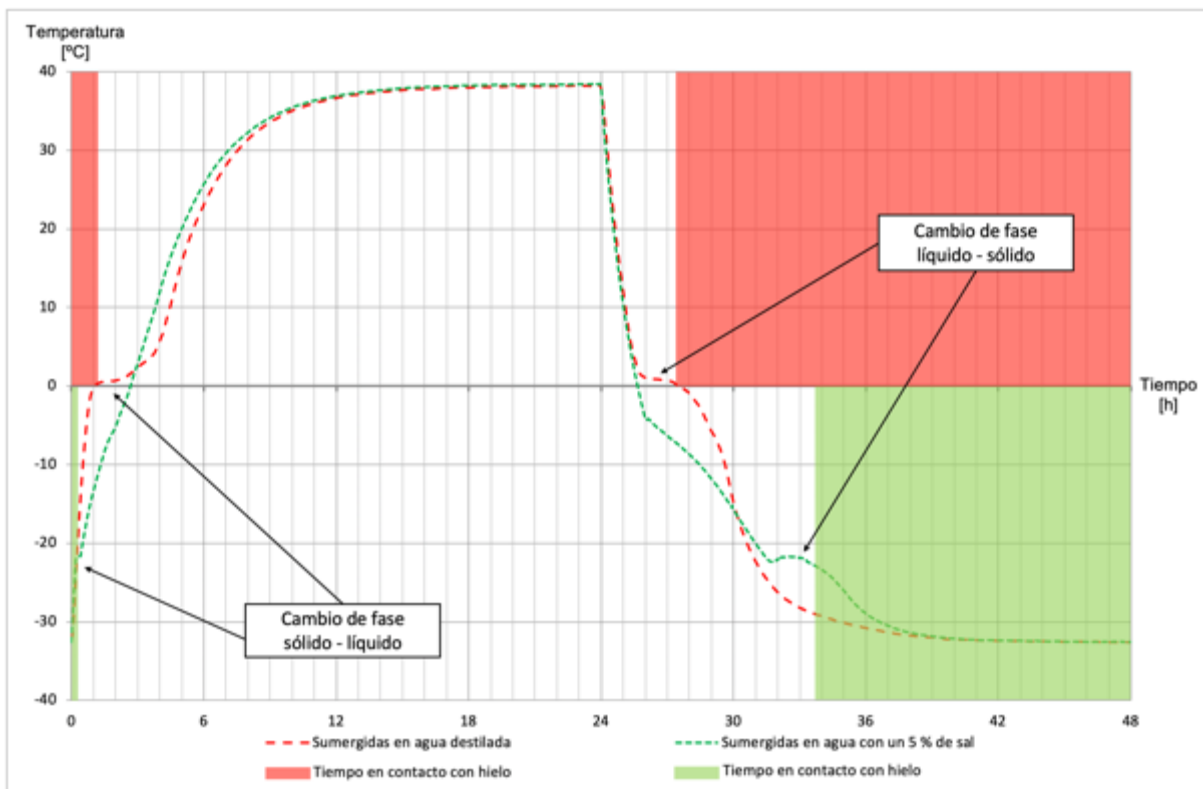


Figura 69. Tiempo que cada muestra está en contacto con hielo.

Fuente: Elaboración propia.

Las probetas se introdujeron en recipientes (Figura 70) cuyas dimensiones variaron en función del tipo de probeta que debían albergar. Al igual que en el caso de las muestras sumergidas en agua salada, en el interior de estos recipientes se dispusieron unas superficies plásticas perforadas para que el agua pudiese rodear completamente a las probetas. Una vez dentro de dichos recipientes, estos alternaban las fases fría y caliente, en el congelador (Figura 71) y la estufa respectivamente (Figura 72), según el proceso anteriormente descrito.



Figura 70. Recipientes para ciclos de hielo-deshielo.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 71. Congelador y estufa para ciclos de hielo-deshielo.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 72. Estufa para ciclos de hielo-deshielo.
Fuente: Elaboración propia.

4.2.3. Un año a la intemperie

Las muestras que se vieron afectadas por esta interacción térmica permanecieron a la intemperie, protegidas de la lluvia, en Santander (España) (Figura 73), desde el 20 de diciembre de 2016 al 20 de diciembre de 2017. Del mismo modo que para las series sometidas a cinco ciclos de hielo-deshielo, las muestras se separaron en tres grupos: probetas secas, probetas sumergidas en agua destilada y probetas sumergidas en agua con un 5 % de sal.

Las muestras secas se colocaron directamente en el exterior sobre una superficie dura y plana. Sin embargo, las series de muestras sumergidas se introdujeron cada una en un contenedor de plástico que, como se ha comentado en el caso de las muestras sumergidas en agua con sal o en las muestras sometidas a cinco ciclos de hielo-deshielo, disponían en su interior de unas superficies de plástico perforadas para que el agua pudiese rodear a las probetas. Los contenedores de plástico se taparon de manera que no pudiese entrar ningún tipo de precipitación (Figura 74).



Figura 73. Situación de Santander (España).
Fuente: Elaboración propia.



Figura 74. Probetas secas y probetas sumergidas a la intemperie.
Fuente: Elaboración propia.

La temperatura máxima y mínima diaria en Santander durante el periodo que las probetas estuvieron a la intemperie fue registrada por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) (Figura 75).

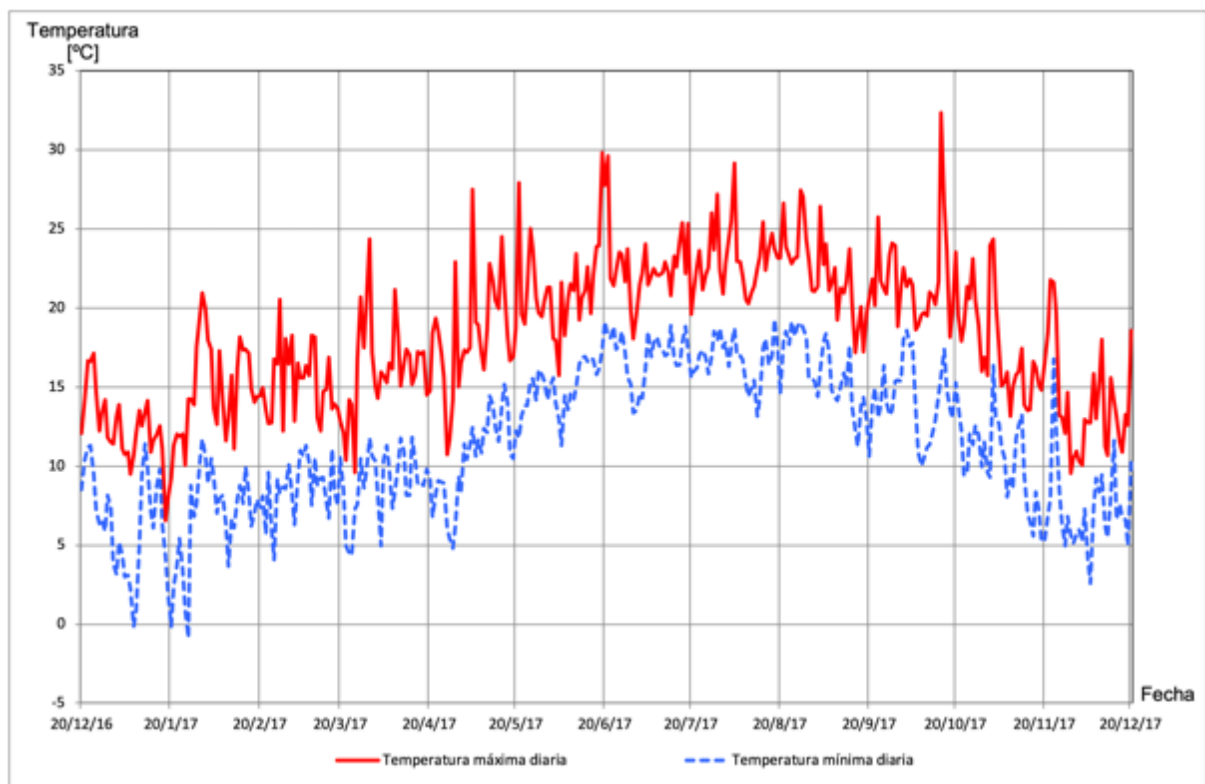


Figura 75. Temperatura máxima y mínima diaria en Santander.
Fuente: Elaboración propia.

4.3. ENSAYOS

Para obtener la caracterización mecánica de estas series se han llevado a cabo los siguientes ensayos:

- Densidad aparente y volumen de huecos;
- Resistencia a la tracción indirecta y sensibilidad al agua;
- Ensayo de rodadura;
- Ensayo cántabro (pérdida de partículas en mezclas porosas);
- Módulo resiliente;
- Módulo dinámico;
- Ensayo de fatiga.

4.3.1. Densidad aparente y volumen de huecos

Con estos ensayos se pretendió caracterizar la densidad aparente y el contenido de huecos de aire de las distintas series de mezclas bituminosas. Las probetas fabricadas para obtener estos valores fueron cilíndricas, con un diámetro de 101,6 mm. y una altura de 63,5 mm. Las muestras de AC-16 Surf D se compactaron aplicándose 75 golpes por cara, mientras que a las de PA-16 se les aplicó únicamente 50 golpes por cara. En las probetas en las cuales se añadió sal como árido, la densidad de la sal ($2,165 \text{ g/cm}^3$) fue tomada en cuenta. Cuatro probetas de cada serie fueron evaluadas para estos ensayos.

Para determinar la densidad aparente de las muestras, se siguieron las especificaciones de la norma UNE-EN 12697-6 [59] empleando el *Procedimiento B: Densidad aparente – Superficie saturada seca (SSD)* para las muestras AC y el *Procedimiento D: Densidad aparente por método geométrico* para las muestras PA.

La densidad aparente mediante el *Procedimiento B* (Figura 76), de superficie saturada seca, se calcula a través de la siguiente expresión:

$$\rho_{bdry} = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \cdot \rho_w$$

Donde:

ρ_{bdry} es la densidad aparente en seco, en gramos por centímetro cúbico (g/cm^3);

m_1 es la masa de la probeta seca, en gramos (g);

m_2 es la masa de la probeta en el agua, en gramos (g);

ρ_w es la densidad del agua a la temperatura de ensayo, en gramos por centímetro cúbico (g/cm³).



Figura 76. Inmersión de las probetas para determinar su densidad.

Fuente: Elaboración propia.

La densidad aparente a través del Procedimiento D, por el método geométrico, se calcula mediante esta expresión:

$$\rho_{bdim} = \frac{m_1}{\frac{\pi}{4} \cdot h \cdot d^2} \cdot 10^3$$

Donde:

ρ_{bdim} es la densidad aparente de la probeta mediante el procedimiento "por método geométrico", en gramos por centímetro cúbico (g/cm³);

m_1 es la masa de la probeta seca, en gramos (g);

h es la altura de la probeta, en milímetros (mm);

d es el diámetro de la probeta, en milímetros (mm).

El cálculo del contenido de huecos de aire (V_m) (Figura 77), aparece descrito en la UNE-EN 12697-8 [60]. Para poder determinarlo, es necesario obtener previamente la densidad máxima de la mezcla bituminosa (UNE-EN 12697-5) [58]. En esta investigación se calculó a través del Procedimiento C. Procedimiento matemático:

$$\rho_{mc} = \frac{100}{(p_a/\rho_a) + (p_b/\rho_b)}$$

$$p_a + p_b = 100\% \text{ (m/m)}$$

Donde:

ρ_{mc} es la densidad máxima de la mezcla determinada mediante cálculo, en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3) con aproximación a 1 kg/m^3 ;

p_a es el porcentaje de árido existente en la mezcla, con aproximación al 0,1 % (m/m);

ρ_a es la densidad aparente del árido, en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3) con aproximación a 1 kg/m^3 ;

p_a es el porcentaje de ligante existente en la mezcla, con aproximación al 0,1 % (m/m);

ρ_a es la densidad del ligante a 25°C , en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3) con aproximación a 1 kg/m^3 .

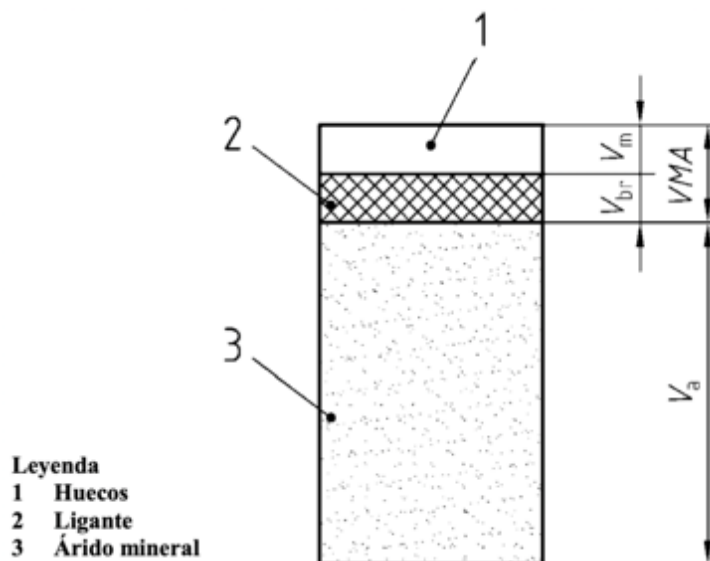


Figura 77. Contenido de huecos de aire (V_m).

Fuente: UNE-EN 12697-8 [60].

Una vez calculada esta densidad máxima y sabiendo la densidad aparente, fue posible calcular el V_m a través de la siguiente expresión:

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \cdot 100\% \text{ (v/v)}$$

Donde:

V_m es el contenido de huecos de aire de la mezcla, expresado como un porcentaje con una aproximación del 0,1 por ciento (v/v);

ρ_m es la densidad máxima de la mezcla, en kilogramos por metro cúbico (kg/m³);

ρ_b es la densidad aparente de la probeta, en kilogramos por metro cúbico (kg/m³).

4.3.2. Resistencia a la tracción indirecta y sensibilidad al agua

Con estos ensayos se trató de determinar tanto la resistencia a la tracción indirecta (ITS) de la mezcla, que es la resistencia máxima (calculada) a la tracción de una probeta cilíndrica sometida a carga diametral hasta su rotura; como la adhesividad árido-ligante cuando está se ve influida por la acción del agua.

El método empleado para la obtención de la ITS aparece descrito en la norma *UNE-EN 12697-23* [51] (Figura 78). Para este ensayo, se emplearon probetas cilíndricas, con las mismas dimensiones que las utilizadas para calcular la densidad aparente y el contenido de huecos.

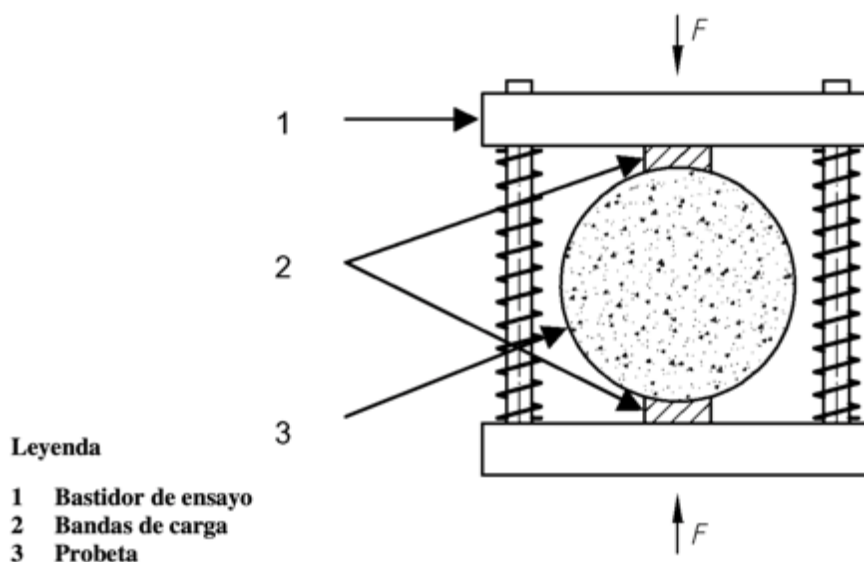


Figura 78. Bastidor de ensayo con bandas de carga y probeta.

Fuente: *UNE-EN 12697-23* [51].

Este tipo de probetas se compactaron mediante el procedimiento de compactación por impacto (cincuenta golpes por cara) (*UNE-EN 12697-30*) [54] (Figura 79).



*Figura 79. Máquina empleada para la compactación por impacto.
Fuente: Elaboración propia.*

Cada serie de probetas cilíndricas se dividió en dos subconjuntos (probetas secas y húmedas) del mismo tamaño y con aproximadamente la misma longitud y densidad media. Ambos subconjuntos tenían la misma edad.

Las probetas, una vez fabricadas, medidas y clasificadas en alguno de los dos subgrupos, se curaron durante veinticuatro horas, antes de su acondicionamiento.

Las probetas secas se almacenaron sobre una superficie plana con una temperatura de 20 ± 5 °C. Las probetas húmedas por su parte se colocaron en un baño de agua a 40 ± 1 °C durante 72 horas (Figura 80 y Figura 81). El baño de agua de las probetas húmedas de las series sumergidas en agua con sal tiene la concentración de sal correspondiente a su serie.



*Figura 80. Comprobación de la temperatura del baño.
Fuente: Elaboración propia.*



*Figura 81. Probetas en el baño.
Fuente: Elaboración propia.*

Tras su acondicionamiento, se llevaron las probetas a la temperatura de ensayo (15 °C). El grupo de probetas secas alcanzó esta temperatura en una cámara de aire controlada termostáticamente. Las probetas húmedas lograron dicha temperatura en un baño de agua. Ambos grupos permanecieron en dichas condiciones durante dos horas. Las probetas húmedas, antes de ensayarse, se secaron con una toalla. Se ensayaron dentro del minuto posterior a su extracción de la cámara o del baño.

A continuación, se procedió a realizar el ensayo, aplicando diametralmente la carga (Figura 82) hasta la rotura (Figura 83). La ITS se determinó mediante la siguiente expresión:

$$ITS = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot H}$$

Donde:

ITS es la resistencia a tracción indirecta, expresada en gigapascuales (GPa), redondeada a tres dígitos significativos;

P es la carga máxima, expresada en kilonewtons (kN), redondeada a tres dígitos significativos;

D es el diámetro de la probeta, expresado en milímetros (mm), con un decimal;

H es la altura de la probeta, expresada en milímetros (mm), con un decimal.



*Figura 82. Probeta preparada para ser ensayada a tracción indirecta.
Fuente: Elaboración propia.*



*Figura 83. Probetas rotas tras ser ensayadas a tracción indirecta.
Fuente: Elaboración propia.*

Una vez realizados todos los ensayos de una serie, se estuvo en disposición de calcular la relación de la resistencia a la tracción indirecta, en porcentaje (ITSR), que nos indicará la sensibilidad al agua (UNE-EN 12697-12) [48], mediante la fórmula:

$$ITSR = 100 \cdot \frac{ITS_w}{ITS_d}$$

Donde:

ITS_R es la razón de la resistencia a la tracción indirecta, expresada en porcentaje (%);

ITS_w es el porcentaje de resistencia a la tracción indirecta del grupo de probetas húmedas, expresado en kilopascales (kPa), redondeado a tres dígitos significativos;

ITS_d es el porcentaje de resistencia a la tracción indirecta del grupo de probetas secas, expresado en kilopascales (kPa), redondeado a tres dígitos significativos.

Si bien son necesarias al menos seis probetas de cada serie para realizar el ensayo de sensibilidad al agua, en esta tesis se emplearon ocho.

4.3.3. Ensayo de rodadura

Con este ensayo se pretendió determinar la susceptibilidad de la mezcla bituminosa a deformarse cuando está sometida a una carga. Esta susceptibilidad se evaluó por la rodadura formada por pasadas repetidas, a temperatura constante (60 °C), de una rueda sometida a carga. También pudo estimarse la resistencia a la desenvuelta cuando se realizó la variante con la probeta sumergida en agua.

Las probetas utilizadas para este ensayo son prismáticas y tienen unas medidas de 410 mm de largo, 260 mm de ancho y 50 mm de alto. El proceso de fabricación fue el mismo que para las probetas cilíndricas (Figura 84), pero una vez finalizada la envuelta en amasadora (Figura 85), la mezcla se atemperó a 150 °C durante hora y media en una estufa.



Figura 84. Fabricación de mezcla bituminosa en amasadora.

Fuente: Elaboración propia.



*Figura 85. Aspecto de la mezcla recién envuelta.
Fuente: Elaboración propia.*

Una vez atemperada, se procedió a compactar la mezcla. En esta tesis, la compactación se llevó a cabo mediante un compactador de placa con rodillo de acero (UNE-EN 12697-33) [55] (Figura 86 y Figura 87).



*Figura 86. Compactación por medio de un compactador de placa con rodillo de acero.
Fuente: Elaboración propia.*



Figura 87. Aspecto de una probeta para el ensayo de rodadura recién compactada.
Fuente: Elaboración propia.

Tras compactarse, las probetas se ensayaron por el *Procedimiento B* de la norma *UNE-EN 12697-22 Ensayo de rodadura* [50] (Figura 88). Se realizaron ensayos tanto en aire, como en agua.

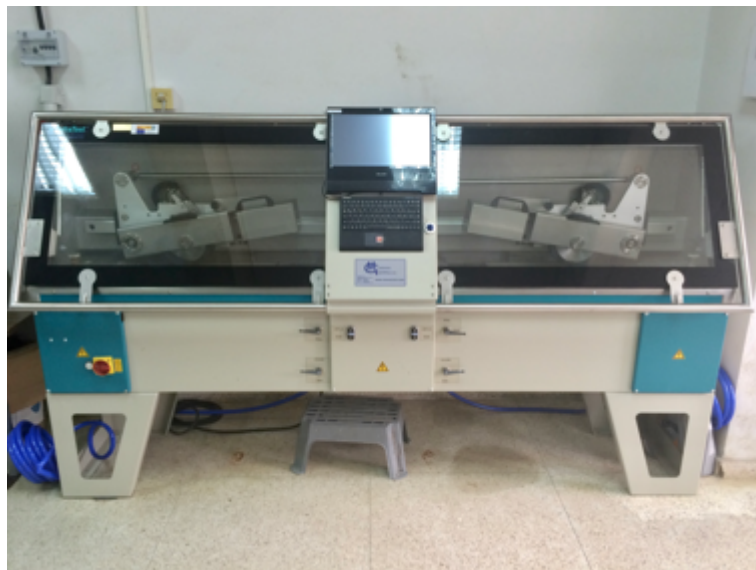


Figura 88. Máquina del ensayo de rodadura.
Fuente: Elaboración propia.

Para las probetas ensayadas en aire, la pendiente de deformación en pista, en mm para 10^3 ciclos de carga, se calculó mediante la fórmula:

$$WTS_{AIRE} = \frac{(d_{10.000} - d_{5.000})}{5}$$

Donde:

WTS_{AIRE} es la inclinación de la rodada, en mm para 10^3 ciclos de carga;

d_{5000} , d_{10000} es la profundidad de la rodada después de 5.000 ciclos de carga y de 10.000 ciclos de carga, en milímetros (mm).

En las probetas que fueron ensayadas en agua (Figura 89 y Figura 90), la fórmula fue análoga a la anterior:

$$WTS_{AGUA} = \frac{(d_{10.000} - d_{5.000})}{5}$$

Donde:

WTS_{AGUA} es la inclinación de la rodada, en mm para 10^3 ciclos de carga.



Figura 89. Detalle de la inmersión de una probeta en el ensayo de rodadura en agua.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 90. Probeta en el ensayo de rodadura en agua.

Fuente: Elaboración propia.

El resultado del ensayo fue el valor medio del WTS_{AIRE} o WTS_{AGUA} . En caso de que algún ensayo hubiese terminado antes de llegar a los 10.000 ciclos de carga, la pendiente de deformación en pista se hubiera calculado sobre la parte lineal de la curva representativa de la profundidad de la rodera, a condición de que la curva correspondiera a 2.000 ciclos de carga como mínimo.

Del mismo modo también se calculó, tanto para el ensayo realizado en aire como en agua, la profundidad media de la rodera (RD_{AIRE} y RD_{AGUA}) (Figura 91).



Figura 91. Aspecto de la rodada de una probeta tras el ensayo de rodadura.
Fuente: Elaboración propia.

4.3.4. Ensayo cántabro (pérdida de partículas en mezclas porosas)

El ensayo cántabro, o de pérdida de partículas de una probeta de mezcla bituminosa drenante, trata de caracterizar la pérdida por desgaste que tienen las mezclas bituminosas de granulometría porosa. También puede evaluar el efecto de desenvuelta, para lo cual hay que sumergir en agua las probetas antes de la realización del ensayo.

La variante seca del ensayo aparece recogida en la UNE-EN 12697-17 [49], mientras que la variante húmeda lo hace en la NLT-362 [29].

Las probetas ensayadas fueron cilíndricas. Las dimensiones y el proceso de fabricación no difirieron de los empleados para las probetas del Método Marshall. Las probetas fueron compactadas con cincuenta golpes por cara.

Cada serie de probetas se dividió en dos grupos, grupo seco y grupo húmedo.

- El grupo seco una vez compactado, medido y pesado se introdujo en una cámara a 25 °C un día antes de ensayarse.
- El grupo húmedo tras haber sido compactado, medido y pesado se sumergió un día en agua a 60 °C y luego se dejó otro día en una cámara a 25 °C antes de ensayarse.

Como se hizo en el ensayo de sensibilidad al agua, el baño de agua de las probetas del grupo húmedo de las series sumergidas en agua con sal, tiene la concentración de sal correspondiente a su serie.

El ensayo consiste en introducir una probeta en el tambor de la máquina de Los Ángeles (sin bolas) (Figura 92) y tras 300 revoluciones se calcula el porcentaje de peso que ha perdido la probeta (Figura 93). Este calculo se realiza mediante la siguiente expresión:

$$p \% = \frac{p_1 - p_2}{p_1} \cdot 100$$

Donde:

- p Valor de la pérdida por desgaste, expresado en porcentaje;
- p_1 Masa inicial de la probeta, en gramos;
- p_2 Masa final de la probeta, en gramos.



Figura 92. Máquina de Los Ángeles e introducción de una probeta en ella.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 93. Aspecto de una probeta tras el ensayo cántabro.
Fuente: Elaboración propia.

4.3.5. Módulo resiliente

Las mezclas bituminosas son materiales no elásticos, es decir, experimentan deformaciones permanentes después de la aplicación de una carga. Estos materiales, durante su servicio se ven sometidos a una gran cantidad de ciclos dinámicos de carga-descarga. Ante estos ciclos de carga, la deformación de las mezclas bituminosas puede dividirse en dos partes: deformaciones permanentes o plásticas y deformaciones elásticas o recuperables. Cuando el número de ciclos de carga-descarga aumenta, la deformación plástica acumulada permanece constante. En ese momento, toda la deformación es recuperable, y la relación entre la tensión y dicha deformación es el módulo resiliente (Figura 94).

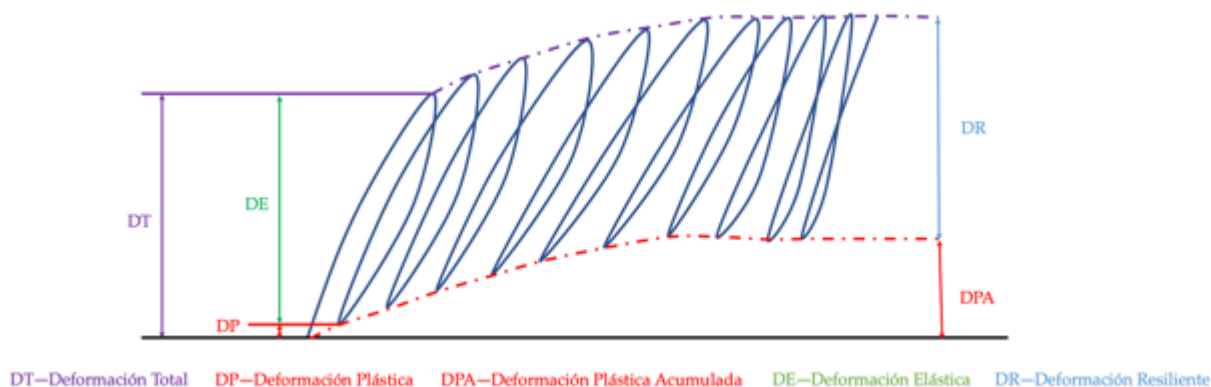


Figura 94. Diagrama módulo resiliente.
Fuente: Elaboración propia.

El método empleado para la obtención de este parámetro siguió las indicaciones de la norma UNE-EN 12697-26 [53] en su Anexo C. Este método emplea la tracción indirecta sobre probetas cilíndricas

(Figura 95) de dimensiones, fabricación y compactación análogas a las empleadas en el ensayo de sensibilidad al agua.

El ensayo fue llevado a cabo tanto a las probetas secas, como a las húmedas. Los grupos húmedos, después de compactarse, medirse y pesarse, se mantuvieron tres días en un baño de agua a 40 °C. Al igual que en los ensayos de sensibilidad al agua y cántabro, el baño de agua de las probetas húmedas de las series sumergidas en agua con sal, tiene la concentración de sal correspondiente a su serie.

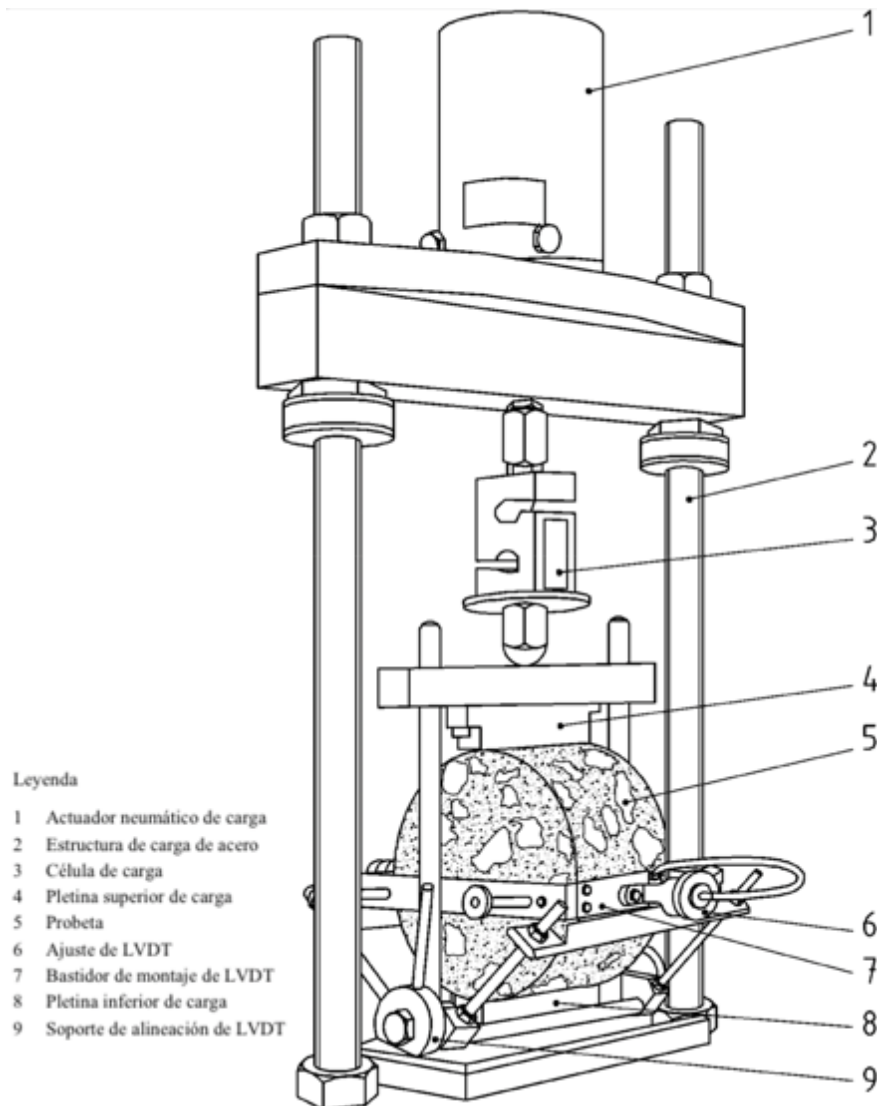


Figura 95. Ejemplo de equipo de ensayo necesario para obtener el módulo resiliente.
Fuente: UNE-EN 12697-26 [53].

Las probetas fueron marcadas en dos diámetros de manera que la distancia entre ambos fuera de 90°. En uno de dichos diámetros se colocaron las pletinas que sirven para determinar la deformación que experimenta la probeta (Figura 96 y Figura 97).

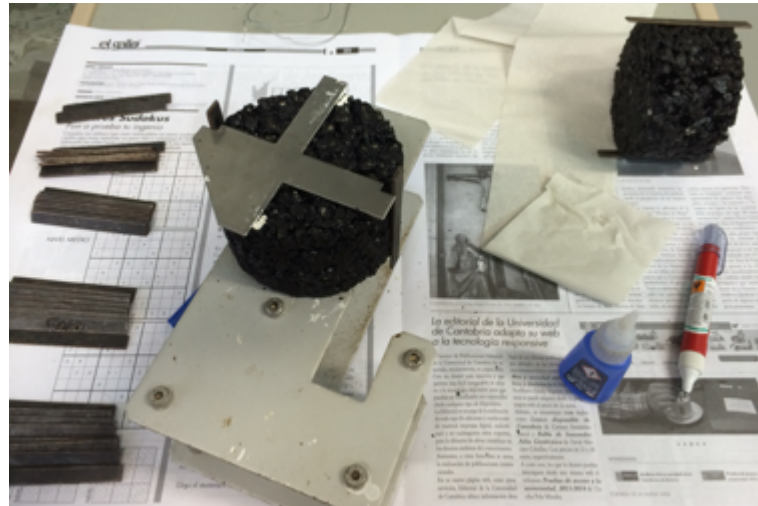


Figura 96. Elementos necesarios para la preparación de las probetas.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 97. Herramienta empleada para colocar las pletinas sobre un diámetro.
Fuente: Elaboración propia.

Todas las probetas, adecuadamente marcadas y colocadas sus pletinas se llevaron a la temperatura de ensayo (20 °C), tras lo cual estuvieron ya en condiciones de ser ensayadas (Figura 98).



*Figura 98. Máquina empleada para la obtención del módulo resiliente.
Fuente: Elaboración propia.*

Las probetas se colocaron en la máquina de manera que uno de los diámetros marcados estuviese en posición vertical y que el diámetro en que se encuentran las pletinas estuviera en horizontal.

Cada probeta fue solicitada a 16 ciclos de carga. Cada ciclo se compuso de una carga de 4,5 KN durante 124 milisegundos (8Hz) y una descarga. La carga fue aplicada en sentido vertical y la deformación medida fue la que se produjo en el plano horizontal (Figura 99). No todos los ciclos fueron empleados en los cálculos, únicamente se utilizaron los comprendidos entre los ciclos 11 y 15, ambos inclusive. Las mediciones obtenidas en estos cinco ciclos de carga se emplearon para determinar el módulo de rigidez medido, aplicando la siguiente fórmula:

$$S_m = \frac{F \cdot (v + 0,27)}{(z \cdot h)}$$

Donde:

S_m es el módulo de rigidez medido, expresado en megapascasles (MPa);

F es el valor máximo de la carga vertical aplicada, expresado en Newtons (N);

z es la amplitud de la deformación horizontal (Figura 100) obtenida durante el ciclo de carga, expresada en milímetros (mm);

h es el espesor medio de la probeta, expresado en milímetros (mm);

ν es el coeficiente de Poisson.



Figura 99. Probeta preparada para ser ensayada.
Fuente: Elaboración propia.

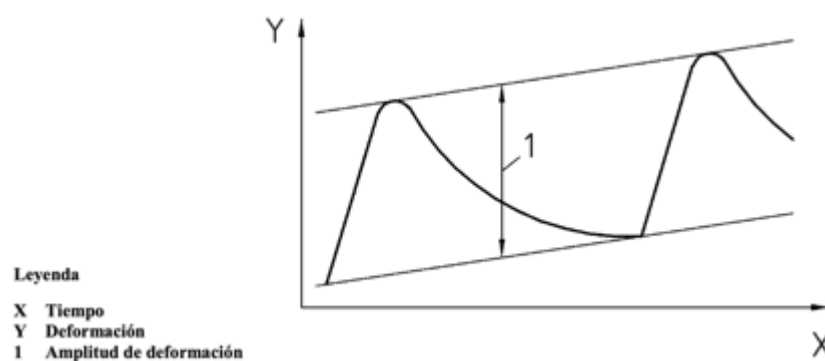


Figura 100. Amplitud de deformación.
Fuente: UNE-EN 12697-26 [53].

El módulo de rigidez medido debe ajustarse a un factor de superficie de carga de 0,60. Para ello se utilizó la siguiente fórmula:

$$S'_m = S_m \cdot (1 - 0,322 \cdot (\log(S_m) - 1,82) \cdot (0,60 - k))$$

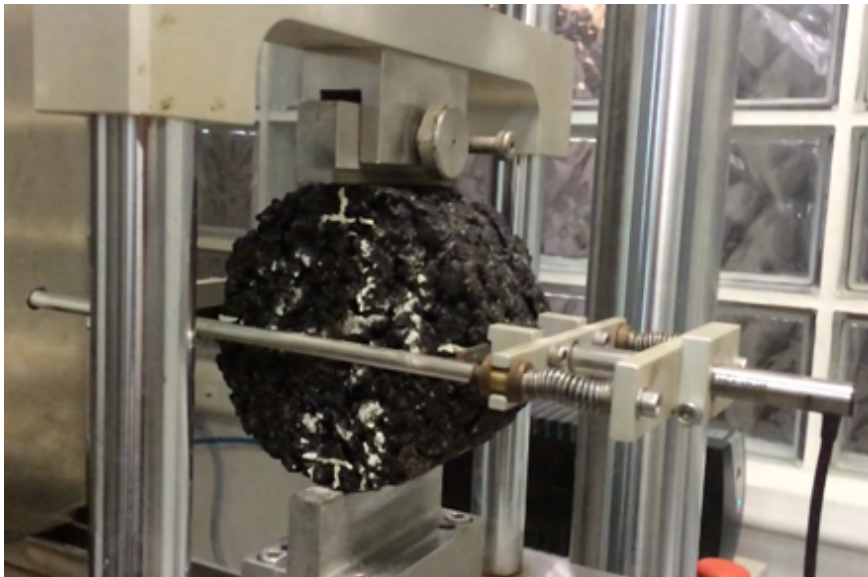
Donde:

S'_m es el módulo de rigidez, expresado en megapascuales (MPa), para un factor de superficie de carga de 0,60;

k es el factor de superficie de carga medido;

S_m es el módulo de rigidez medido, expresado en megapascuales (MPa), para un factor de carga k , expresado en grados Celsius (°C).

Cada probeta, una vez ensayada por uno de sus diámetros, se retiró de la máquina y se quitaron y limpiaron las pletinas. Una vez transcurridas 24 horas se procedió a ensayarlas una segunda vez, girándolas 90° alrededor de su eje horizontal respecto a como fueron ensayadas la primera vez (Figura 101).



*Figura 101. Máquina empleada para la obtención del módulo resiliente.
Fuente: Elaboración propia.*

Si el valor del módulo de rigidez del segundo ensayo estaba comprendido entre el +10 % y el -20 % del valor registrado en el primer ensayo, el valor medio de los dos ensayos se calculó y registró como el módulo de rigidez de la probeta. En caso de que la diferencia fuera mayor, se desechó la probeta.

4.3.6. Módulo dinámico

En el método para determinar el módulo resiliente se aplica una onda de tipo sinusoidal, se descansa, se aplica una nueva onda y así sucesivamente. Los ensayos dinámicos aplican una onda de forma continua, de tal manera que se puede evaluar cómo varía la onda que representa las deformaciones con respecto a la onda que representa la tensión. Esta información es importante ya que en los materiales bituminosos hay un desfase entre la sollicitación aplicada y la respuesta del material (Figura 102). Este desfase aporta información acerca de cómo de viscoso es el material. Conforme aumenta el desfase, el material es más viscoso.

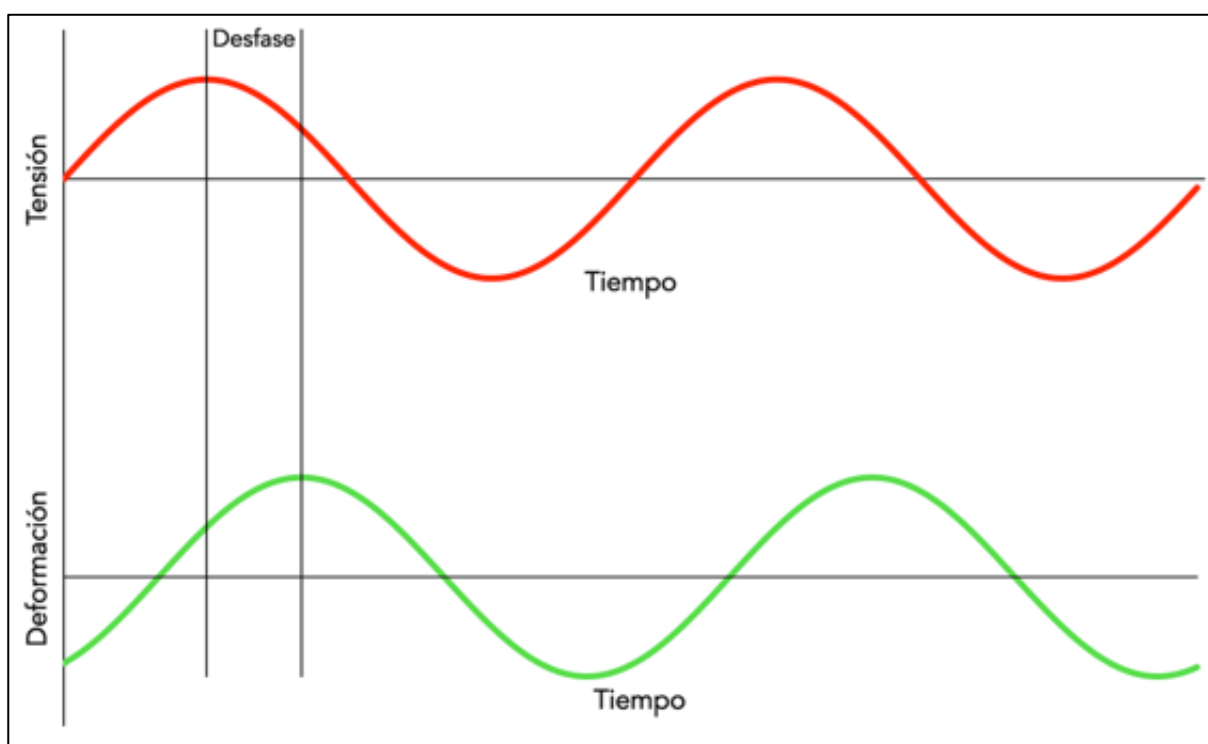


Figura 102. Desfase entre la sollicitación aplicada y la respuesta del material.
Fuente: Elaboración propia.

El módulo se puede definir como un número complejo en el que:

- La parte real representa la rigidez elástica del material.
- La parte imaginaria indica el amortiguamiento interno del material.

El ensayo se realizó aplicando la norma UNE-EN 12697-26 [53] Anexo B.

Las probetas se fabricaron de la misma manera que las probetas del ensayo de rodadura, la envuelta se realizó en amasadora y la compactación se hizo por medio de un compactador de placa con rodillo de acero. En este caso las probetas se fabricaron con un espesor de 80 mm.

Una vez fabricadas las probetas se procedió a serrarlas (Figura 103) para que adquirieran la forma geométrica necesaria para la realización del ensayo. Siendo las dimensiones: 60 mm de ancho, 60 mm de alto y 410 mm de largo.



*Figura 103. Probeta en el momento de ser serrada.
Fuente: Elaboración propia.*

Tras conformar la forma final de las probetas se procedió a medir y pesar cada una de ellas (Figura 104).



*Figura 104. Medición de las probetas.
Fuente: Elaboración propia.*

Una vez medidas las probetas se ensayaron, tanto las probetas secas, como las húmedas. En el caso de estas últimas, se esperó hasta que éstas estuviesen completamente secas para llevarlas a la temperatura de ensayo. La temperatura de secado, almacenamiento y finalmente ensayo de las probetas fue de 20 °C.

Dentro del *Anexo B* de la Norma se especifican dos variantes:

- Ensayo de flexión en tres puntos sobre probetas prismáticas (3PB-PR).
- Ensayo de flexión en cuatro puntos sobre probetas prismáticas (4PB-PR).

Se empleó en esta tesis el procedimiento de flexión en cuatro puntos (Figura 105).

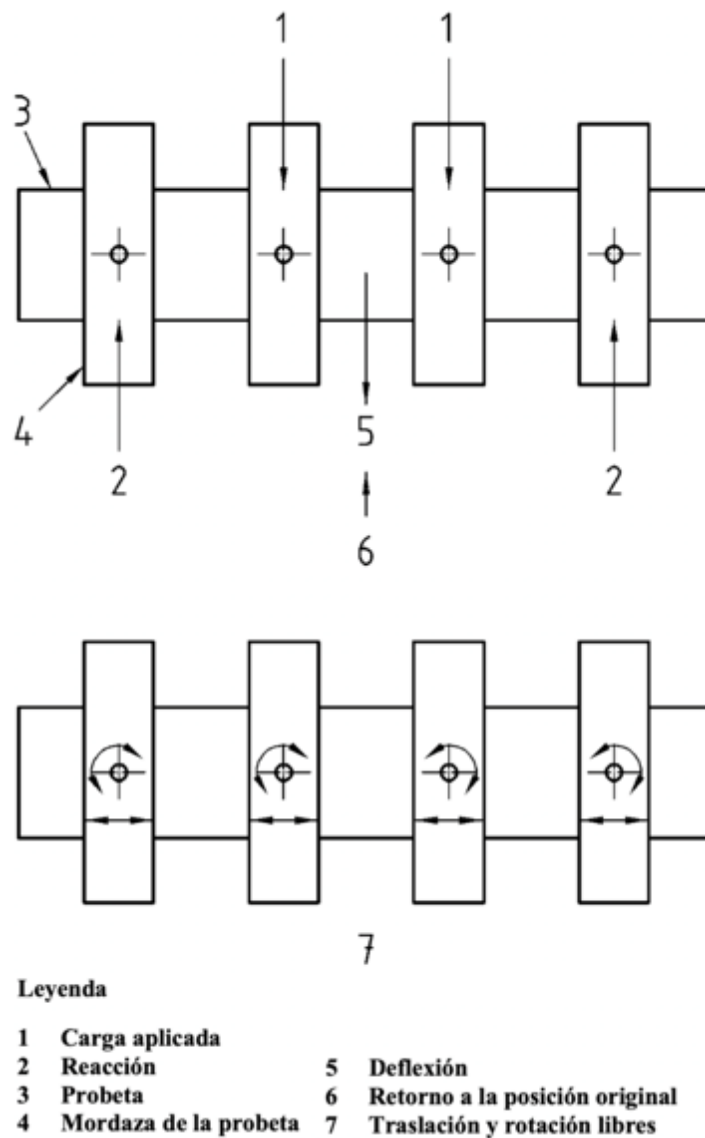


Figura 105. Principios básicos de la flexión en 4 puntos.
Fuente: EN 12697-26 [53].

Las probetas se introdujeron en la máquina de manera que la cara por la que fueron compactadas permaneciera en posición vertical. La flexión se realizó por el movimiento vertical de la zona central perpendicularmente al eje longitudinal de la probeta; las posiciones verticales de los puntos extremos permanecieron fijas (Figura 106).



*Figura 106. Probeta siendo ensayada para la obtención del módulo dinámico.
Fuente: Elaboración propia.*

En el ensayo se aplicaron una serie de ciclos con un desplazamiento simétrico alrededor del cero sinusoidal y una amplitud vertical constante de 0,02691 mm con el fin de que las fibras exteriores de la probeta experimentasen una deformación de $50 \pm 3 \mu\text{m/m}$. Durante todo el ensayo se midió la tensión necesaria para producir dicha deformación a lo largo del tiempo, así como el desfase (ϕ) entre el máximo de la tensión y el máximo de la deformación. Cuanto más cerca esté ϕ de cero, el comportamiento de la mezcla bituminosa es más semejante al de un material elástico.

Finalmente, a través de esta expresión se determinó el módulo dinámico:

$$E^* = \frac{\sigma_t}{\varepsilon_t} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \cos \phi + i \cdot \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \sin \phi$$

Donde:

E^* es el módulo dinámico;

σ_t es la tensión;

ε_t es la deformación;

σ_0 es la tensión aplicada;

ε_0 es la amplitud de la deformación elástica;

ϕ es el desfase.

4.3.7. Ensayo de fatiga

Aunque para unas condiciones de baja temperatura y elevada velocidad de aplicación de las cargas, el comportamiento de las mezclas sea prácticamente elástico, la aplicación de sucesivos ciclos de cargas con un valor inferior al de rotura produce un agotamiento progresivo de la mezcla bituminosa por fatiga. El aumento del desplazamiento elástico en la superficie bajo la acción de una carga (deflexión), puede conducir a un agrietamiento generalizado (piel de cocodrilo).

Existen diversas variantes para caracterizar la fatiga de las mezclas bituminosas mediante ensayos alternativos, incluyendo los ensayos de flexión y los ensayos de tracción directa o indirecta. En esta investigación se siguió la Norma UNE-EN 12697-24 [52] en su Anexo D: *Ensayo de flexión en cuatro puntos sobre probetas prismáticas*.

El proceso de fabricación de las probetas fue exactamente igual al de las probetas del ensayo para la obtención del módulo dinámico. Fueron envueltas con amasadoras, compactadas mediante un compactador de placa con rodillo de acero y posteriormente serradas para que las dimensiones finales de las probetas fueran 60 mm de ancho, 60 mm de alto y 410 mm de largo (Figura 107).

Una vez serradas, se midieron y pesaron. Posteriormente, al igual que en las probetas que se emplearon para el cálculo del módulo dinámico, se ensayaron tanto en seco como en húmedo.

Las probetas húmedas fueron completamente secadas antes de ser llevadas a la temperatura de ensayo. La temperatura de secado, almacenamiento y finalmente ensayo fue de 20 °C.



*Figura 107. Compactación y serrado de las probetas de fatiga.
Fuente: Elaboración propia.*

La frecuencia del ensayo fue de 30 Hz y el número de ciclos máximo aplicado en cada ensayo no fue superior los $2 \cdot 10^6$, límite que establece la norma. El criterio de fallo establecido fue el momento en que la rigidez de la probeta alcanzase el 50 % de la rigidez medida en el ciclo 100. Para cada serie se ensayaron probetas en tres niveles distintos de deformación, con el fin de que la curva obtenida fuese representativa del comportamiento de la mezcla bituminosa en función de cualquier número de ciclos de carga (N) (Figura 108).



*Figura 108. Aspecto de una probeta tras ser ensaya a fatiga.
Fuente: Elaboración propia.*

Los resultados de la ley de fatiga se expresaron en una gráfica en la cual los ejes fueron, en escala logarítmica, la deformación (ε) y el número de ciclos (N).

$$\log N = A_0 + A_1 \cdot \log \varepsilon$$

Donde:

N es el número de ciclos;

A_0 es la ordenada en el origen;

A_1 es la pendiente de la recta;

ε es la deformación.

4.4. SÍNTESIS DE METODOLOGÍA

4.4.1. AC – 16 Surf D

La metodología seguida para la realización de ensayos sobre la mezcla bituminosa AC-16 Surf D fue la descrita a continuación.

En un primer momento se analizaron únicamente los resultados de la mezcla bituminosa fabricada en laboratorio y sin ningún tipo de interacción térmica, es decir, a temperatura constante.

Se comenzó realizando los ensayos para determinar la densidad aparente, el volumen de huecos, la resistencia a tracción indirecta y la sensibilidad al agua. Para estas pruebas se seleccionaron, además de la muestra de referencia, sobre la que se realizaron todos los ensayos, todas las series correspondientes a cada uno de los tratamientos con sal:

- Muestras sumergidas en agua con sal:
 - Agua de mar (3,5 % de sal),
 - Agua con 5 % de sal,
 - Agua con 10 % de sal;
- Sal añadida a la mezcla como árido:
 - 5 % de sal en función del peso de betún,
 - 10 % de sal en función del peso de betún,
 - 38 % de sal en función del peso de betún,
 - 95 % de sal en función del peso de betún;
- Árido saturado en agua con sal antes de emplearlo en la mezcla:
 - Agua con un 2 % de sal,
 - Agua con un 3,5 % de sal,
 - Agua con un 5 % de sal.

Para el ensayo de rodadura se escogió una serie de cada uno de los tratamientos de sal. La serie escogida fue aquella que hubiese obtenido en el ensayo de sensibilidad al agua un resultado próximo al 90 %, el límite que establece el PG-3:

- Muestras sumergidas en agua con sal:
 - Agua con 10 % de sal;

- Sal añadida a la mezcla como árido:
 - 38 % de sal en función del peso de betún;
- Árido saturado en agua con sal antes de emplearlo en la mezcla:
 - Agua con un 2 % de sal.

Para determinar el módulo dinámico se seleccionaron dos series de cada tratamiento de sal, y al igual que en el caso del ensayo de rodadura, esta elección se basó en aquellas series que hubiesen logrado en el ensayo de sensibilidad al agua unos valores cercanos a los establecidos por el PG-3:

- Muestras sumergidas en agua con sal:
 - Agua con 5 % de sal,
 - Agua con 10 % de sal;
- Sal añadida a la mezcla como árido:
 - 38 % de sal en función del peso de betún,
 - 95 % de sal en función del peso de betún;
- Árido saturado en agua con sal antes de emplearlo en la mezcla:
 - Agua con un 2 % de sal,
 - Agua con un 3,5 % de sal.

A continuación, en una segunda fase de la investigación, se comenzó a analizar la interacción de la temperatura sobre la mezcla AC-16 Surf D fabricada en planta asfáltica. Las interacciones térmicas tomadas en consideración fueron, además de la temperatura constante a modo de referencia, someter a las muestras a cinco ciclos de hielo-deshielo y mantenerlas un año a la intemperie. De cada una de estas interacciones se analizó una serie seca, así como dos series sumergidas, una en agua destilada y otra en agua con un 5 % de sal. La elección de este porcentaje se fundamentó en que, para dicha concentración de sal en el agua, se obtuvieron los mejores resultados en sensibilidad al agua durante la primera fase de la tesis. En esta parte de la investigación se realizaron los ensayos de:

- Densidad aparente y volumen de huecos;
- Resistencia a la tracción indirecta y sensibilidad al agua;
- Ensayo de rodadura;
- Módulo resiliente;
- Módulo dinámico;
- Ensayo de fatiga.

La Figura 109 muestra de manera esquemática la totalidad de los ensayos realizados sobre la mezcla AC-16 Surf D a lo largo de esta Tesis Doctoral:

			Densidad aparente y volumen de huecos		Resistencia a la tracción indirecta y sensibilidad al agua		Ensayo de rodadura		Módulo resiliente		Módulo dinámico		Fatiga	
			L	P	L	P	Seco	Húmedo	Seco	Húmedo	Seco	Húmedo	Seco	Húmedo
Ofita de referencia			Temperatura constante	L	P	L	P	L	L	L	P	P	P	P
			Hielo-deshielo	P	P						P	P	P	P
			Un año a la intemperie	P	P	P					P	P	P	P
Muestras sumergidas en agua salada	Agua de mar (3,5% de sal)	Temperatura constante	L	L										
	Agua con 5% de sal	Temperatura constante	L	P	L	P	L	P	L	L		P		P
		Hielo-deshielo	P	P								P		P
		Un año a la intemperie	P	P	P							P		P
	Agua con 10% de sal	Temperatura constante	L	L	L	L	L	L	L	L				
Sal añadida a la mezcla como árido	5% de sal en función del peso de betún	Temperatura constante	L	L										
	10% de sal en función del peso de betún		L	L										
	38% de sal en función del peso de betún		L	L	L	L	L	L	L	L				
	95% de sal en función del peso de betún		L	L					L	L				
Árido saturado en agua con sal antes de emplearlo en la mezcla	Agua con un 2% de sal	Temperatura constante	L	L	L	L	L	L	L	L				
	Agua con un 3,5% de sal		L	L					L	L				
	Agua con un 5% de sal		L	L										

L / Mezcla fabricada en laboratorio P / Mezcla fabricada en planta

Figura 109. Resumen de ensayos realizados en la mezcla AC-16 Surf D.
Fuente: Elaboración propia.

4.4.2. PA – 16

En el caso de la mezcla bituminosa PA-16, la metodología para seleccionar las series que iban a ser examinadas en cada ensayo fue la siguiente.

Se comenzó analizando la mezcla PA con el betún convencional 50/70. Para esta mezcla con este betún, se realizaron los ensayos de: densidad aparente, volumen de huecos, resistencia a tracción indirecta y sensibilidad al agua. Aparte de una serie de referencia, para la cual se realizaron todos los test, se ensayaron a estas pruebas todas las series de cada uno de los tratamientos con sal:

- Muestras sumergidas en agua con sal:
 - Agua de mar (3,5 % de sal),
 - Agua con 5 % de sal,
 - Agua con 10 % de sal;
- Sal añadida a la mezcla como árido:
 - 5 % de sal en función del peso de betún,
 - 10 % de sal en función del peso de betún,
 - 42,5 % de sal en función del peso de betún,
 - 106 % de sal en función del peso de betún;
- Árido saturado en agua con sal antes de emplearlo en la mezcla:
 - Agua con un 2 % de sal,
 - Agua con un 3,5 % de sal,
 - Agua con un 5 % de sal.

Posteriormente a la ejecución de estas pruebas se realizó el ensayo de rodadura a una muestra de referencia. Dicha muestra falló antes de la finalización del test, por lo que se determinó no realizar esta prueba en la mezcla PA con betún convencional para ninguna de las otras series.

A continuación se efectuó el ensayo cántabro (pérdida de partículas en mezclas porosas). Se escogió qué series iban a ser testeadas de una manera muy similar a como se eligieron las series de mezcla AC ensayadas a rodadura; se seleccionaron aquellas series que obtuvieron un resultado en sensibilidad al agua cercano al límite que establece el PG-3, un 85 % en el caso de las mezclas porosas. De este modo, se ensayaron muestras secas y sumergidas de las siguientes series:

- Muestras sumergidas en agua con sal:

- Agua de mar (3,5 % de sal),
 - Agua con 5 % de sal;
- Sal añadida a la mezcla como árido:
 - 42,5 % de sal en función del peso de betún,
 - 106 % de sal en función del peso de betún;
- Árido saturado en agua con sal antes de emplearlo en la mezcla:
 - Agua con un 2 % de sal,
 - Agua con un 3,5 % de sal.

Tras el ensayo cántabro, el siguiente test que se realizó fue el que determinaba el módulo resiliente de la mezcla bituminosa. Para esta prueba se escogieron las mismas series que para el ensayo anterior y además se añadió la serie sumergida en agua con un 10 % de sal.

Para acabar con las muestras de mezcla PA-16 con betún 50/70, se realizaron los ensayos de módulo dinámico y fatiga sobre una muestra de referencia, tanto seca como sumergida en agua destilada y sobre muestras sumergidas de cada una de las dos series siguientes:

- Sal añadida a la mezcla como árido:
 - 106 % de sal en función del peso de betún;
- Árido saturado en agua con sal antes de emplearlo en la mezcla:
 - Agua con un 3,5 % de sal.

La elección de estas dos series se debió a que ambas obtuvieron los mejores resultados, dentro de las series analizadas en su tratamiento con sal, en el ensayo de sensibilidad al agua.

Una vez finalizado el estudio de la mezcla PA-16 con el betún convencional, se inició el correspondiente al de muestras fabricadas en laboratorio con betún modificado PMB 45/80-65. Para este betún se analizaron la densidad, el volumen de huecos, la resistencia a tracción indirecta y la sensibilidad al agua de una muestra de referencia, así como de aquellas series para las que, con el betún 50/70, se obtuvieron resultados próximos al 85 % en el ensayo de sensibilidad al agua.

- Muestras sumergidas en agua con sal:
 - Agua con 5 % de sal,
 - Agua con 10 % de sal;
- Sal añadida a la mezcla como árido:

- 106 % de sal en función del peso de betún;
- Árido saturado en agua con sal antes de emplearlo en la mezcla:
 - Agua con un 3,5 % de sal.

Con este betún modificado, la muestra de referencia seca sí que completó el ensayo de rodadura, por lo que se realizaron ensayos sobre muestras secas de las siguientes series:

- Sal añadida a la mezcla como árido:
 - 106 % de sal en función del peso de betún;
- Árido saturado en agua con sal antes de emplearlo en la mezcla:
 - Agua con un 3,5 % de sal.

Para completar el estudio de las muestras de PA-16 con betún PMB 45/80-65 fabricadas en laboratorio, se realizó el ensayo cántabro sobre las siguientes series de muestras, tanto en seco como en húmedo:

- Muestras sumergidas en agua con sal:
 - Agua con 5 % de sal,
 - Agua con 10 % de sal;
- Sal añadida a la mezcla como árido:
 - 106 % de sal en función del peso de betún;
- Árido saturado en agua con sal antes de emplearlo en la mezcla:
 - Agua con un 3,5 % de sal.

Por último, se estudió la mezcla PA-16 con betún modificado PMB 45/80-65 fabricada en una planta asfáltica. De esta muestra se realizaron los ensayos de densidad, volumen de huecos, resistencia a tracción indirecta, sensibilidad al agua y cántabro de una muestra de referencia seca y de tres series sumergidas en agua, una en agua destilada y dos en agua con sal, con un 5 % y un 10 % de sal respectivamente.

En este caso, el ensayo de rodadura pudo finalizarse en la mezcla de referencia tanto para la variante seca como para la variante húmeda. Por este motivo, adicionalmente se ensayó una muestra sumergida en agua con un 10 % de sal.

En la Figura 110 aparecen descritos todos los ensayos que se han llevado a cabo en la mezcla PA-16:

		Temperatura constante		Densidad aparente y volumen de huecos	Resistencia a la tracción indirecta y sensibilidad al agua	Ensayo de rodadura		Ensayo cántabro (pérdida de partículas en mezclas porosas)		Módulo resiliente		Módulo dinámico		Fatiga	
				C M Mp	C M Mp	C M Mp	C M Mp	C M Mp	C M Mp	C M Mp	C M Mp	C M Mp	C M Mp	C M Mp	C M Mp
Ofita de referencia		C M Mp	C M Mp	C M Mp	Mp	C M Mp	C M Mp	C	C	C	C	C	C		
Muestras sumergidas en agua salada	Agua de mar (3,5% de sal)	C M Mp	C			C M Mp	C	C	C						
	Agua con 5% de sal	C M Mp	C M Mp			C M Mp	C M Mp	C	C						
	Agua con 10% de sal	C M Mp	C M Mp	C M Mp	Mp	C M Mp	M Mp	C	C						
Sal añadida a la mezcla como árido	5% de sal en función del peso de betún	C	C												
	10% de sal en función del peso de betún	C	C												
	42,5% de sal en función del peso de betún	C	C			C	C	C	C						
	106% de sal en función del peso de betún	C M	C M	M		C M	C M	C	C		C		C		
Árido saturado en agua con sal antes de emplearlo en la mezcla	Agua con un 2% de sal	C	C			C	C	C	C						
	Agua con un 3,5% de sal	C M	C M	M		C M	C M	C	C		C		C		
	Agua con un 5% de sal	C	C												
C / Betún convencional		M / Betún modificado		Mp / Betún modificado fabricación de la mezcla en planta											

C / Betún convencional

M / Betún modificado

Mp / Betún modificado fabricación de la mezcla en planta

Figura 110. Resumen de ensayos realizados en la mezcla PA-16.

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 5: ARTÍCULOS PUBLICADOS

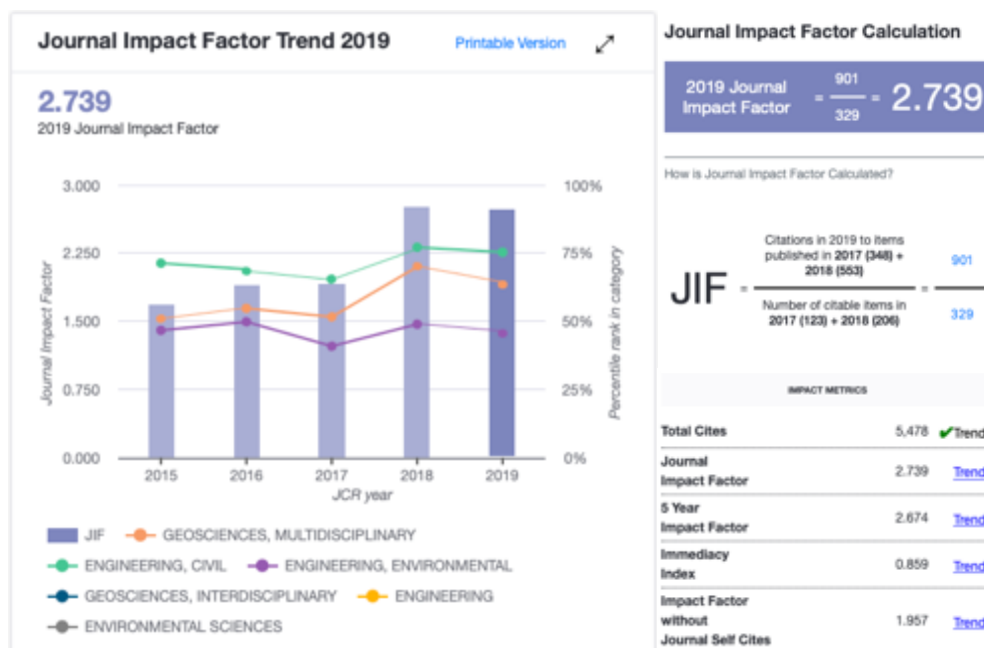
5.1. ARTÍCULO 1

SODIUM CHLORIDE EFFECT IN THE MECHANICAL
PROPERTIES OF THE BITUMINOUS MIXTURES

Luis Juli-Gándara, Ángel Vega-Zamanillo, Miguel Á.
Calzada-Pérez.

Cold Regions Science and Technology, 164,102776,
2019

DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.05.002





Contents lists available at ScienceDirect

Cold Regions Science and Technology

journal homepage: www.elsevier.com/locate/coldregions



Sodium chloride effect in the mechanical properties of the bituminous mixtures

Luis Juli-Gándara*, Ángel Vega-Zamanillo, Miguel Á. Calzada-Pérez

GCS Research Group, Civil Engineering School, Universidad de Cantabria, Santander 39005, Spain



ARTICLE INFO

Keywords:

Salt
NaCl
Hot mix asphalt
Porous asphalt
Mechanical properties
Winter road

ABSTRACT

The purpose of this research is the study on the influence of salt (sodium chloride, NaCl) in bituminous mixtures to know the variation in mechanical properties such as adhesiveness aggregate-binder, mechanical strength, ravelling and plastic deformations of mixtures.

To do this, three types of mixture have been evaluated: a hot mix asphalt with conventional bitumen; and two porous mixtures, one manufactured with a conventional binder and another with modified binder. The effect of the salt is analysed for three different interactions: immerse the specimens in salt water; add salt as aggregate into the mixture; and submerge the aggregate in water with a certain concentration of salt, dry it and then make the mixture with it. The mechanical performance of the mixtures have been determined by Indirect Tensile Strength (ITS), Water Sensitivity Test (ITSR), Wheel Tracking Test and Cantabro Loss Particle Test.

The results show that the hot mix asphalt is scarcely affected when it is submerged in salt water, neither when salt is added as aggregate. However, the porous mixture is more susceptible to the effect of salt for all salt interaction, especially when the aggregate has been submerged in salt water before making the bituminous mixture. The salt in the porous mixtures has a harmful effect, it causes a loss of internal friction.

1. Introduction

Today, one of the main purposes of sodium chloride (NaCl) in civil engineering is its use on high mountain roads. The application of NaCl on the roadways is one of the most used methods to de-ice highways surfaces in winter roads. The use of NaCl for this purpose is mainly due to its physical properties, its great versatility and its price (García, 2010; Muthumani et al., 2013). Its physical properties make its use possible up to temperatures close to -21°C . In addition, as García (2010) say, from -5°C it could be used in combination with calcium chloride (Cl_2Ca) in order to obtain better results. Other studies are aimed at creating tools, with which it is known more efficiently when salt should be applied on the bituminous mixtures. These tools could be based on decision trees as Ikiz and Galip (2016) propose, or as Trenouth et al. (2015) say, implementing computer applications.

Klein-Paste and Wählin (2013) note that, due to anti-icing agents weaken the ice that forms on the roadway, the amount that is used in practice could be reduced by 40% to prevent the pavement from being slippery, which would result in a reduction in costs, Shi et al. (2013) indicate that costs related to negative impacts on vehicles and the environment must be added. This negative impact on the environment is widely studied, the melting salt produces the mobilization of heavy

metals (Cd, Cu, Pb, Zn, Cr and Mo) (Bäckström et al., 2003; Norrström, 2005; Engelsen et al., 2012; Norrström and Jacks, 1998) and an increase in salinity (increment in chlorides) (Rivett et al., 2016).

There is also research on the behaviour that bituminous mixtures have when they are in contact with de-icing salt. Wang et al. (2015) study how salt, in comparison with other types of de-icing agents, such as sand and quartz dust, influence the skid resistance, and observe that when the de-icer used is salt, the aggregates on the surface do not polish, as it happens slightly in the case of quartz powder and considerably more when the de-icer is quartz sand. Hassan et al. (2012) research the mechanical properties of the bituminous mixtures affected by different types of de-icing agents and freeze-thaw cycles. In the case of the specimens submerged in salt water, an increase in indirect tensile strength is observed respect the specimens submerged in distilled water for 25 and 50 freeze-thaw cycles.

There are also investigations in which different types of additives are used, added to the mixture as aggregate, to avoid the formation of ice in the roadways composed basically of salt (NaCl and CaCl_2) (Giuliani et al., 2012; Zheng et al., 2015). Liu et al. (2013) use an additive of this type, conduct a study of the mechanical properties of the mixture (Indirect Tensile Strength, Water Sensitivity Test) and observe that the smaller antifreeze additive particles are the better water

* Corresponding author.

E-mail addresses: luis_juli@hotmail.com (L. Juli-Gándara), vegaa@unican.es (Á. Vega-Zamanillo), calzadam@unican.es (M.Á. Calzada-Pérez).

<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.05.002>

Received 29 May 2018; Received in revised form 16 April 2019; Accepted 2 May 2019

Available online 06 May 2019

0165-232X/ © 2019 Elsevier B.V. All rights reserved.

sensitivity results obtained, reaching an increase of 7% when the additive used is the smallest.

Not all the investigations conducted until now are based on the de-icing salt due to winter road processes. Feng et al. (2010) research the influence of the salt in bituminous mixtures because they have been submerged in seawater and have remained under freeze-thaw cycles. This fact is simulated by adding salt to the bitumen and subjecting the specimens to freeze-thaw cycles. They note, for the three types of bituminous mixture studied (AM-16, OGFC-19 and AC-16), a decrease in water sensitivity, more evident in the AM mixture and less in the AC mixtures. Obika et al. (1989) conduct a research about the damages produced by the salt that reaches the bituminous mixtures in hot climates, determining that the salt crystallization, solubility and crystal pressures have important roles in the damage produced in the mixture.

The purpose of this paper is to evaluate the mechanical performance of bituminous mixtures that have been:

- submerged in saltwater or,
- manufactured with salt (as aggregate or as anti-icing additive) or,
- manufactured with aggregates that had been submerged in salt water.

Indirect Tensile Strength (ITS), Water Sensitivity Test (ITSR), Wheel Tracking Test and Cantabro Loss Particle Test have been done to determine the mechanical performance of the mixtures.

2. Materials

2.1. Salt and seawater

Salt used is NaCl, with a density of 2.165 g/cm³. Particle size of salt appears in Table 1.

Seawater has been used as an individual case of saltwater. Seawater was facilitated by the Maritime Museum of the Cantabrian Sea. This water comes from the Bay of Santander (Spain) and was filtered by a 50 µm sieve. It has a salt concentration (completely dissolved) of 3.5% and an electrical conductivity of 4.93 S/m at 19.1 °C.

2.2. Binder

For this work, two different types of bitumen, which are frequently used in Spain, have been used: a conventional B 50/70 bitumen and a modified bitumen PMB 45/80-65 (Table 2).

2.3. Aggregate

In this research, the aggregate used is ophite, with a density of 2.921 g/cm³. Other properties of aggregate are in Table 3.

2.4. Mixture

Three types of mixture, which are frequently used in Spain, have been studied: an AC-16 Surf B 50/70 D; and 2 PA-16, one with B 50/70 and the other with PMB 45/80-65. The compositions used for mixtures are in Table 4.

The manufacture of the mixture in laboratory is done in a mixer

with vertical shaft and planetary rotation. In the first place the aggregate and the bitumen are added; mix for 1 min, after that the mineral powder is added and mixing continues for 3 min more.

3. Methodology

3.1. Salt treatments for bituminous mixture

The effect of the salt is analysed in three different ways.

3.1.1. Specimens submerged in salt water

To study this effect, specimens of mixture are submerged in water with different concentrations of salt completely dissolved (Table 5). These amounts of salt by weight of water are based in the percentage of salt in seawater (3.5%) and two different increments. The temperature and time that the specimens are submerged varies according to the test requirements.

3.1.2. Salt added to the mixture as aggregate

In this case salt is added into the mixture when it is being mixed as if it was aggregate, in a similar way to the one used in other studies (Giuliani et al., 2012; Zheng et al., 2015; Liu et al., 2013). The amounts of salt that are added appear in Table 6. In C1 and C2 series the amount of salt by weight of bitumen is the same in both types of mixture. The difference between AC-16 Surf D and PA-16 in C3 and C4 series is due to the amount of salt is by weight of aggregates (2% for C3 and 5% for C4). The amount of salt is considered an additive, not a replacement of aggregate.

3.1.3. Aggregate saturated in salt water before using it in the mixture

For these series of specimens, the aggregate, which will be used in the manufacture, is placed in plastic containers, in which there is water with different salt concentrations, as it is described in Table 7. The aggregate is kept submerged in salt water for 72 h at 20 °C, enough time to saturate it completely. After this the aggregate is dried in the same containers at 60 °C for 24 h. Finally the material is transferred to metal containers and introduced in the heater to obtain the mixing temperature. The amounts of salt by weight of water, as in the case of the specimens submerged in salt water, are based in the percentage of salt in seawater (3.5%). The density and the particle size of the aggregates are not modified after this treatment.

3.2. Tests

3.2.1. Density and air void content

Density and air void content in mixture are measured for all the specimens according to the Marshall Test (UNE-EN 12697-34, 2013). The specimens of AC-16 Surf D are compacted by 75 blows per side, while in the PA-16 specimens the number of blows per side is 50. The dimensions of the specimens are 101.6 mm diameter by 63.5 mm height. In the case of the specimens in which the salt is added as aggregate, the density of the salt used (2.165 g/cm³) is taken into account. This test is carried out for all types of mixture and four specimens for each series.

3.2.2. Indirect Tensile Strength (ITS) and Water Sensitivity Test (ITSR)

These tests aim to obtain the mechanical strength of the mixture and determine how the aggregate-binder adhesive is influenced by the action of water. The test procedure is "Method A" of the UNE-EN 12697-12, 2009 standard, with a compaction of the specimens by impact (UNE-EN 12697-30, 2013), with 50 blows per side, as established by PG-3 (Spanish Standard). The dimensions of the specimens are 101.6 mm diameter by 63.5 mm height.

This test is done for all specimens with conventional bitumen. It is also carried out for those specimens with modified bitumen, analogous to the conventional bitumen, which have had a result close to the limit

Table 1
Particle size of salt.

Passing rate (%)								
Sieve size (mm)	22.00	16.00	8.00	4.00	2.00	0.50	0.25	0.063
Salt	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	74.90	39.90	6.60

Table 2
Properties of bitumens.

Bitumen	Penetration (25 °C; 100 g, 5 s) [0.1 mm] (UNE-EN 1426, 2015)	Softening point [°C] (UNE-EN 1427, 2015)	Frass breaking point [°C] (UNE-EN 12593, 2015)
B 50/70	65.0	47.2	−9
PMB 45/80-65	49.5	72.3	−13

Table 3
Properties of aggregate.

Aggregate	Los Angeles Abrasion Test [%] (UNE-EN 1097-2, 2010)	Water Absorption [%] (UNE-EN 1097-6, 2014)	Flakiness Index [%] (UNE-EN 933-3, 2012)
Ophite	16.0	1.0	9.0

The mineral powder (filler) is limestone, with a density of 2.753 g/cm³.

Table 4
Composition of bituminous mixtures.

Passing rate (%)	Asphalt content s/m (%)							
Sieve size (mm)	22.00	16.00	8.00	4.00	2.00	0.50	0.25	0.063
AC-16 Surf D	100.00	95.00	71.50	51.50	38.50	21.50	15.50	6.00
PA-16	100.00	95.00	50.00	20.00	13.50	8.50	6.50	4.71

The manufacture of the mixture is done in the laboratory, but in the series of PA-16 mixture with PMB 45/80-65 bitumen submerged in salt water, a mixture produced in an asphalt plant is also analysed.

Table 5
Specimens submerged in salt water.

Series	Amount of salt by weight of water (%)		Description
	AC-16 Surf D	PA-16	
A (Reference)	0.0	0.0	Distilled water
B1	3.5	3.5	Seawater
B2	5.0	5.0	Salt added to distilled water
B3	10.0	10.0	Salt added to distilled water

Table 6
Specimens in which the salt is added as aggregate into the mixture.

Series	Amount of salt by weight of bitumen (%)	
	AC-16 Surf D	PA-16
A (Reference)	0.0	0.0
C1	5.0	5.0
C2	10.0	10.0
C3	38.0	42.5
C4	95.0	106.0

When the mixture is being manufactured it can be seen that salt does not dissolve in the bitumen. It is as an aggregate.

Table 7
Specimens in which the aggregate is saturated in salt water before mixing.

Series	Amount of salt by weight of water (%)	
	AC-16 Surf D	PA-16
A (Reference)	0.0	0.0
D1	2.0	2.0
D2	3.5	3.5
D3	5.0	5.0

Crusts of salt in the plastic containers and on the aggregates are observed before transferring the material to the metal containers. In addition, in D3 series, small conglomerates of aggregates appear.

established by PG-3 in its article 542.5.1.4, 80% for base and binder layers and 85% for surface layers. For that series, four specimens of each one have been tested.

3.2.3. Wheel tracking test

The purpose of this test is to determine the susceptibility of the specimen to be deformed when a moving vertical load is applied. The test is carried out in accordance with the standard UNE-EN 12697-22:2008+A1, 2008 "Procedure B in air" and "Procedure B in water", compacted by roller compactor (UNE-EN 12697-33:2006+A1, 2007). The dimensions of the specimens are 410.0 mm length, by 260.0 mm width by 50.0 mm height. 0.07 and 0.10 mm/10³ cycles of Wheel Track Slope (WTS) are the limits established by PG-3 depending on the heavy traffic categories. Although in Spain this test is only mandatory in its variant in air and for hot mix asphalt, in this study it is also carried out in the porous mixtures to compare them.

In the same way as in ITS and ITSR of specimens produced with modified bitumen, this test is only done for cases in which the ITSR result was close to the limit established by PG-3. For that series, two specimens of each one have been tested.

3.2.4. Cantabro loss particle test

This test aims to characterize the loss of particles due to wear that bituminous mixtures with open granulometry have (ravelling). Also, in the wet variant, the loss of adhesiveness aggregate-binder can be evaluated. The test procedure, in its dry way, is described in UNE-EN 12697-17:2006+A1, 2007 and the test temperature is 25 °C. In the case of the wet way (NLT-362, 1992), before the set up at 25 °C, the specimens are immersed 1 day in a water bath at 60 °C. For specimens that are submerged in salt water, this water will have the corresponding amount of dissolved salt. The dimensions of the specimens are the same as those of the ITS and ITSR. The PG-3 establishes for the dry way a limit of 20% or 25% depending on the heavy traffic categories, and for the wet way a limit of 35% or 40% depending on the heavy traffic category, too.

As in previous cases, tests are only done for the series that in the ITSR obtained a value close to the limit marked by PG-3. For that series, four specimens of each one have been tested.

Table 8
Density and air void content.

	Series	AC-16 Surf D		PA-16		PMB 45/80-65			
		B 50/70		B 50/70		PMB 45/80-65			
		Laboratory		Laboratory		Laboratory		Asphalt plant	
		Density (gr/cm ³)	Voids (%)	Density (gr/cm ³)	Voids (%)	Density (gr/cm ³)	Voids (%)	Density (gr/cm ³)	Voids (%)
Reference	A	2.513	6.1	2.165	19.8	2.181	19.2	2.152	20.3
Specimens submerged in salt water	B1	2.514	6.1	2.167	19.7	–	–	–	–
	B2	2.515	6.0	2.166	19.7	2.174	19.4	2.150	20.3
	B3	2.505	6.4	2.174	19.5	2.174	19.4	2.153	20.2
Salt added as aggregate	C1	2.513	6.0	2.187	18.9	–	–	–	–
	C2	2.493	6.7	2.181	19.1	–	–	–	–
	C3	2.488	6.6	2.201	18.1	–	–	–	–
	C4	2.455	7.3	2.224	16.7	2.265	15.2	–	–
Aggregate saturated in salt water	D1	2.503	6.5	2.168	19.7	–	–	–	–
	D2	2.457	8.2	2.202	18.4	2.161	19.9	–	–
	D3	2.505	6.4	2.168	19.7	–	–	–	–

Table 9
Indirect tensile strength and water sensitivity.

	Series	AC-16 Surf D				PA-16				PMB 45/80-65			
		B 50/70				B 50/70				PMB 45/80-65			
		Laboratory				Laboratory				Laboratory			
		Maximum load (kN)				Maximum load (kN)				Maximum load (kN)			
		ITSR (%)				ITSR (%)				ITSR (%)			
		Dry	Wet			Dry	Wet			Dry	Wet		
Reference	A	1687	1610	95		920	873	95		1414	1427	100	
Specimens submerged in salt water	B1	1687	1575	93		920	894	97		–	–	–	
	B2	1687	1636	97		920	825	90		1414	1431	101	
	B3	1687	1590	92		920	865	95		1414	1418	100	
Salt added as aggregate	C1	1595	1559	97		920	888	96		–	–	–	
	C2	1477	1493	101		843	786	93		–	–	–	
	C3	1625	1471	90		966	781	81		–	–	–	
	C4	1468	1432	98		866	736	85		1370	1179	86	
Aggregate saturated in salt water	D1	1595	1299	81		941	498	53		–	–	–	
	D2	1369	1040	76		885	589	66		1366	1031	76	
	D3	1544	1156	75		887	359	40		–	–	–	

Table 10
Wheel track slope.

	Series	AC-16 Surf D		PA-16		
		B 50/70		PMB 45/80-65		
		Laboratory		Laboratory		Asphalt plant
		WTS (mm/10 ³ cycles)		WTS (mm/10 ³ cycles)		WTS (mm/10 ³ cycles)
		In air	In water	In air	In air	In water
Reference	A	0.08	0.07	0.34	0.08	0.08
Specimens submerged in salt water	B2	–	–	0.34	0.08	–
	B3	0.08	0.05	0.34	0.08	0.16
Salt added as aggregate	C3	0.07	0.07	–	–	–
	C4	–	–	0.16	–	–
Aggregate saturated in salt water	D1	0.07	0.07	–	–	–
	D2	–	–	0.34	–	–

4. Results and discussion

4.1. Density and air void content

The densities and air void content in mixture of the analysed specimens are shown in Table 8. The manufacturing process of the specimens that are immersed in salt water does not differ from the one of the reference series, the values of densities and air void content in mixture are similar in these series to those obtained with the reference, in all types of mix and for all bitumens.

In the series in which the salt is added as aggregate to the mixture, a significant change in both tests is observed. This change is due to the fact that the salt modifies the particle size of the aggregates. In the AC-16 Surf D, due to the lower density of the salt used (2.165 g/cm³) respect to the density of the aggregate (2.921 g/cm³) and that it is a hot mix asphalt, the salt does not fill voids, it produces a slight increase in the total volume of the specimen (the void volume increases) and a decrease of the density. This variation is greater as the amount of salt added to the mixture is increased. In PA-16 specimens the process is different. In this case, the mixture has a high volume of air voids, when adding the salt, it fills part of these voids, that produces an increase in density and a decrease in the volume of air voids. As in the case of the hot mix asphalt, this difference widens when the amount of salt added is bigger.

Table 11
Rut depth.

	Series	AC-16 Surf D		PA-16		
		B 50/70		PMB 45/80-65		
		Laboratory		Laboratory	Asphalt plant	
		RD (mm)		RD (mm)	RD (mm)	
		In air	In water	In air	In air	In water
Reference	A	3.2	4.0	4.8	1.9	2.4
Specimens submerged	B2	–	–	4.8	1.9	–
in salt water	B3	3.2	2.3	4.8	1.9	3.2
Salt added as	C3	3.2	3.7	–	–	–
aggregate	C4	–	–	3.0	–	–
Aggregate saturated in	D1	3.0	3.0	–	–	–
salt water	D2	–	–	4.8	–	–

For specimens in which the aggregate has been saturated in salt water before the material combination, small differences are observed with respect to the reference series due to the fact that treatment does not modify the granulometry of the mixture.

4.2. Indirect Tensile Strength (ITS) and Water Sensitivity Test (ITSR)

The results of Indirect Tensile Strength and Water Sensitivity are shown in Table 9. For specimens submerged in salt water no significant variation is observed, except in the case of the PA-16 produced in plant, in which an increase in the maximum wet load is observed as the salinity of the water increases.

In the case of specimens in which the salt is added as aggregate, the behaviour observed in the porous mixture and in the hot mix asphalt is different. When it is a hot mix asphalt, the values of the dry and wet maximum loads decrease, but the value of the ITSR remains similar to the reference value obtained. This may be due to the fact that the mixture has more aggregate to be blended, the asphalt content percentage is reduced, and the salt is an aggregate softer than the ophite. In porous mixtures, this effect is amplified. Although in this mixture the salt fills voids, the maximum wet load decreases greatly, with the consequent decrease in the value of the ITSR. So for this type of mixture, the fact that the salt is softer than the aggregate used and the reduction of the asphalt content percentage prevails.

In the specimens in which the aggregate is previously saturated in salt water is where there is a more pronounced decrease in the maximum wet load values and consequently in the ITSR. In D1, D2 and D3 series this decrease is not due to chemical factors; in these specimens the aggregate-binder adhesiveness is severely affected due to the salt

film that surrounds the aggregates in the mixing. This fact is amplified in the case of the specimens of PA – 16 because of there is more contact surface with water, reaching a reduction by 58.88% in the value of the maximum wet load, respect to the same value of the reference series.

4.3. Wheel tracking test

Table 10 shows the results corresponding to Wheel Track Slope and Table 11 shows the Rut Depth at 10000 cycles (RD). For the AC-16 Surf D the results obtained are similar in all cases to those obtained in the reference series and with values for WTS that comply the Spanish regulations for most traffic and climate zones.

In PA – 16 mixture, for conventional bitumen, the mixture failed in the reference series, as expected, so no more tests of this mixture with this type of bitumen were carried out. In the case of bitumen PMB 45/80-65, the specimens manufactured in the laboratory obtained a very high WTS and RD in the procedure in air, so the test in the procedure in water was not carried out. However, when salt was added as aggregate there was a noticeable improvement. This is due to the fact that the salt fills the air voids, so that the deformation experienced by the mixture is less than in the reference series. The specimens manufactured in the asphalt plant have a much lower WTS than those made in the laboratory. Even in the RD the results in water variant for specimens manufactured in the asphalt plant have better results than the results in variant air for specimens made in laboratory. So the type of manufacturing affects the results of the porous mixtures in this test. This test is not mandatory for porous mixtures in the Spanish regulation.

4.4. Cantabro loss particle test

The results of the Cantabro Loss Particle Test are shown in Table 12. The specimens submerged in salt water, for all the mixtures, obtain values similar to those of reference, for dry and wet variant.

In the series in which the salt is added as aggregate into the mixture, the results are also similar to those of the reference series, except for the C4 series (the one with the biggest amount of salt) with B 50/70 bitumen, performing the wet variant of the test, in which, as it happened in previous tests, due to the salt is softer than the ophite, the loss of particles obtained increases.

When the aggregate is saturated in salt water before its manufacture, and due to the consequent salt film that surrounds the aggregate particles, the loss of particles is much more important than in the reference series. In particular, in the case of bitumen B 50/70 and the wet variant, the specimen is completely disintegrated. In the specimens that have been saturated in water with 5.0% of salt, the result is 7 times worse than the one obtained in the reference series.

Table 12
Cantabro loss particle test.

	Series	PA-16					
		B 50/70		PMB 45/80-65			
		Laboratory		Laboratory		Asphalt plant	
		Loss particle (%)		Loss particle (%)		Loss particle (%)	
		Dry	Wet	Dry	Wet	Dry	Wet
Reference	A	6.5	12.4	6.9	8.0	21.0	23.8
Specimens submerged in salt water	B1	6.5	13.0	–	–	–	–
	B2	6.5	9.9	6.9	7.7	21.0	22.8
	B3	–	–	6.9	7.0	21.0	34.0
Salt added as aggregate	C3	5.8	12.4	–	–	–	–
	C4	6.1	20.3	9.2	8.0	–	–
Aggregate saturated in salt water	D1	9.2	61.8	–	–	–	–
	D2	9.8	90.7	7.2	16.7	–	–

L. Juli-Gándara, et al.

Cold Regions Science and Technology 164 (2019) 102776

5. Conclusions

The mechanical properties of bituminous mixtures that are submerged in salt water, a situation similar that happens in winter roads when the de-icer agent is salt, are hardly affected.

In AC-16 Surf D mixtures the effect of salt is minimal; however, in porous mixtures the salt has a harmful effect. It produces a loss of internal friction.

Caution must be exercised when introducing salt into the mixture, especially in porous mixtures; due to the fact that the salt is softer than the aggregate, the results in ITSR and Cantabro Loss Particle Test are worse than in the reference series.

The specimens in which the aggregate is previously saturated in salt water are those that have the worst values in ITS, ITSR, Wheel Tracking Test and Cantabro Loss Particle Test. In these specimens the salt creates a film around the aggregate particles severely affecting the aggregate-binder interface, losing all the adhesiveness.

Salt affects more the mixtures PA – 16 than the mixture AC – 16 Surf D, in the tests of ITSR and Wheel Tracking Test, even more when the bitumen used is the B 50/70. This behaviour is due to the fact that the joint action of water and salt deteriorates the mixture, and in the case of the porous mixture the water has a greater access to it.

Acknowledgements

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

References

- Bäckström, M., Karlsson, S., Bäckman, L., Folkesson, L., Lind, B., 2003. Mobilisation of heavy metals by deicing salts in a roadside environment. *Water Res.* 38, 720–732.
- Engelsen, C.J., Wibetoe, G., van der Sloot, H.A., Lund, W., Petkovic, G., 2012. Field site leaching from recycled concrete aggregates applied as sub-base material in road construction. *Sci. Total Environ.* 427–428, 86–97.
- Feng, D., Yi, J., Wang, D., Chen, L., 2010. Impact of salt and freeze-thaw cycles on performance of asphalt mixtures in coastal frozen region of China. *Cold Reg. Sci. Technol.* 62, 31–41.
- García, L., 2010. Eficiencia en vialidad invernal. In: *Materiales empleados en los trabajos para el mantenimiento de la vialidad invernal*, XII Jornadas de Conservación de Carreteras.
- Giuliani, F., Merusi, F., Polacco, G., Filippi, S., Paci, M., 2012. Effectiveness of sodium chloride-based anti-icing filler in asphalt mixtures. *Constr. Build. Mater.* 30, 174–179.
- Hassan, Y., Abd El Halim, A.O., Razaqpur, A.G., Bekheet, W., Farha, M.H., 2012. Effects of runway deicers on pavement materials and mixes: comparison with road salt. *J. Transp. Eng.* 128 (4), 385–391.

- Ikiz, N., Galip, E., 2016. Computerized decision tree for anti-icing/pre-treatment applications as a result of laboratory and field testings. *Cold Reg. Sci. Technol.* 126, 90–108.
- Klein-Paste, A., Wählin, J., 2013. Wet pavement anti-icing – a physical mechanism. *Cold Reg. Sci. Technol.* 96, 1–7.
- Liu, Z., Xing, M., Chen, S., He, R., Cong, P., 2013. Influence of the chloride-based anti-freeze filler on the properties of asphalt mixtures. *Constr. Build. Mater.* 51, 133–140.
- Muthumani, A., Fay, L., Akin, M., Wang, S., Gong, J., Shi, X., 2013. Correlating lab and field tests for evaluation of deicing and anti-icing chemicals: a review of potential approaches. *Cold Reg. Sci. Technol.* 97, 21–32.
- NLT-362, 1992. Efecto del agua sobre la cohesión de mezclas bituminosas de granulometría abierta, mediante el ensayo cántabro de pérdida por desgaste.
- Norrström, A.C., 2005. Metal mobility by de-icing salt from an infiltration trench for highway runoff. *Appl. Geochem.* 20, 1907–1919.
- Norrström, A.C., Jacks, G., 1998. Concentration and fractionation of heavy metals in roadside soils receiving de-icing salts. *Sci. Total Environ.* 218, 161–174.
- Obika, B., Freer-Hewish, R.J., Fookes, G.P., 1989. Soluble salt damage to thin bituminous road and runway surfaces. *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.* 22, 59–73.
- Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3). Rivett, M.O., Cuthbert, M.O., Gamble, R., Connon, L.E., Pearson, A., Shepley, M.G., Davis, J., 2016. Highway deicing salt dynamic runoff to surface water and subsequent infiltration to groundwater during severe UK winters. *Sci. Total Environ.* 565, 324–338.
- Shi, X., Veneziano, D., Xie, N., Gong, J., 2013. Use of chloride-based ice control products for sustainable winter maintenance: a balanced perspective. *Cold Reg. Sci. Technol.* 86, 104–112.
- Trenouth, W.R., Gharabaghi, B., Perera, N., 2015. Road salt application planning tool for winter de-icing operations. *J. Hydrol.* 524, 401–410.
- UNE-EN 1097-2, 2010. Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates – Part 2: Methods for the Determination of Resistance to Fragmentation.
- UNE-EN 1097-6, 2014. Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates – Part 6: Determination of Particle Density and Water Absorption.
- UNE-EN 12593, 2015. Bitumen and bituminous binders. In: *Determination of the Fraass Breaking Point*.
- UNE-EN 12697-12, 2009. Bituminous Mixtures – Test Methods for Hot Mix Asphalt – Part 12: Determination of the Water Sensitivity of Bituminous Specimens.
- UNE-EN 12697-17:2006 + A1, 2007. Bituminous Mixtures – Test Methods for Hot Mix Asphalt – Part 17: Particle Loss of Porous Asphalt Specimen.
- UNE-EN 12697-22:2008 + A1, 2008. Bituminous Mixtures – Test Methods for Hot Mix Asphalt – Part 22: Wheel Tracking.
- UNE-EN 12697-30, 2013. Bituminous Mixtures – Test Methods for Hot Mix Asphalt – Part 30: Specimen Preparation by Impact Compactor.
- UNE-EN 12697-33:2006 + A1, 2007. Bituminous Mixtures – Test Methods for Hot Mix Asphalt – Part 33: Specimen Prepared by Roller Compactor.
- UNE-EN 12697-34, 2013. Bituminous Mixtures – Test Methods for Hot Asphalt – Part 34: Marshall Test.
- UNE-EN 1426, 2015. Bitumen and bituminous binders. In: *Determination of Needle Penetration*.
- UNE-EN 1427, 2015. Bitumen and bituminous binders. In: *Determination of the Softening Point. Ring and Ball Method*.
- UNE-EN 933-3, 2012. Tests for Geometrical Properties of Aggregates – Part 3: Determination of Particle Shape – Flakiness Index.
- Wang, D., Xie, X., Oeser, M., Steinauer, B., 2015. Influence of the gritting material applied during the winter services on the asphalt surface performance. *Cold Reg. Sci. Technol.* 112, 39–44.
- Zheng, M., Zhou, J., Wu, S., Yuan, H., Meng, J., 2015. Evaluation of long-term performance of anti-icing asphalt pavement. *Constr. Build. Mater.* 84, 277–283.

5.2. ARTÍCULO 2

EFFECT OF SODIUM CHLORIDE ON THE MODULUS AND FATIGUE LIFE OF BITUMINOUS MIXTURES

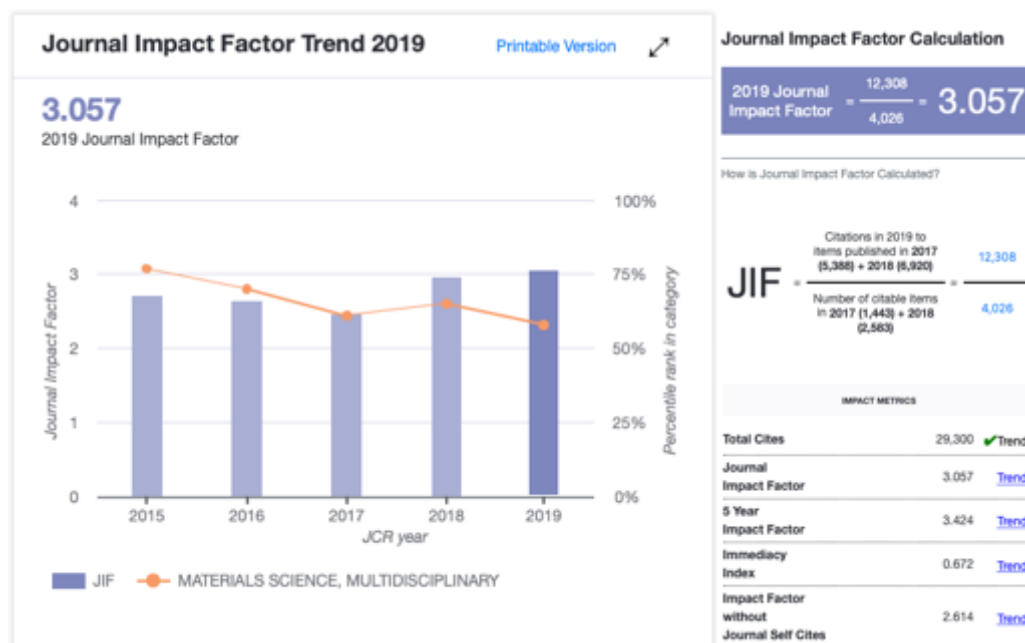
Luis Juli-Gándara, Ángel Vega-Zamanillo, Miguel Á.
Calzada-Pérez, Evelio Teijón-López-Zuazo.

Materials, 13, 2126, 2020.

DOI: 10.3390/ma13092126



materials





Article

Effect of Sodium Chloride on the Modulus and Fatigue Life of Bituminous Mixtures

Luis Juli-Gándara ^{1,*}, Ángel Vega-Zamanillo ¹, Miguel Ángel Calzada-Pérez ¹ and Evelio Teijón-López-Zuazo ²

¹ GCS Research Group, Civil Engineering School, Universidad de Cantabria, 39005 Santander, Spain; vegaa@unican.es (Á.V.-Z.); calzadam@unican.es (M.Á.C.-P.)

² Construction and Agronomy Department, University of Salamanca, 49022 Zamora, Spain; etejon@usal.es

* Correspondence: ljg59@alumnos.unican.es or luis_juli@hotmail.com

Received: 27 March 2020; Accepted: 30 April 2020; Published: 3 May 2020



Abstract: Bituminous mixtures are not perfectly elastic materials, so their viscoelastic properties play a decisive role in knowing their behavior. This research aims to find out this behavior through the values of the resilient modulus, the dynamic modulus, and the fatigue life for asphalt concrete and porous mixtures when they are influenced by the presence of salt (NaCl, sodium chloride). The aforementioned influence of salt has been evaluated by utilizing three different methods: submerging specimens of bituminous mixture in salt water; introducing salt into the specimens as if it was aggregate and immersing the aggregate in salt water; and drying it and then manufacturing the bituminous mixture with it. As the results indicate, the mixtures submerged in salt water do not show large differences in comparison to the reference mixtures for hot mix asphalt and porous mixtures. However, for hot mix asphalt in which salt has been added as aggregate, the resilient modulus is greater than in the reference mixture. For the bituminous mixtures in which an aggregate saturated in salt water has been used for its manufacture, the results of the resilient modulus test, dynamic modulus test, and fatigue life test are lower than in the reference mixture, especially when the specimens are submerged.

Keywords: salt; NaCl; bituminous mixture; resilient modulus; dynamic modulus; fatigue life; winter road

1. Introduction

Sodium chloride (NaCl) is one of the most commonly used materials in civil engineering to combat the formation of ice on roads. To prevent the formation of this ice, salt can be spread on the surface of the bituminous mixture or included in the mixture as an additive, forming part of the aggregate. Salt is used as a deicing agent, stemming from its adaptability, intrinsic properties, and above all, the fact that it is cheaper than the rest of the deicing agents [1,2]. According to García [2], NaCl is more than eight times cheaper than calcium chloride (CaCl₂), the second cheapest deicing agent. In addition, García noted that salt can be used effectively from 0 °C to −5 °C, and even down to −21 °C in combination with CaCl₂. This is a typical Spanish winter temperature range.

Nevertheless, NaCl has a negative environmental impact which has been exhaustively studied. The spreading of NaCl over the pavement generates an alteration in the amount of heavy metals (chromium, lead, or molybdenum) [3–6] and an increase in chlorides [7,8] in the immediate areas surrounding the roads. In order to minimize this negative impact, Ikiz et al. [9] designed a decision tree and Trenouth et al. [10] implemented a computer application to know with precision when salt should be applied in order to reduce the amount of NaCl used on winter roads. Following this trend of

reducing the amount of NaCl spread, Klein-Paste et al. [11] noted that using 60% of the salt currently applied is sufficient to weaken the layers of ice that are formed on road surfaces.

The mechanical behavior of bituminous mixtures that have been in contact with NaCl in comparison with other deicing agents was also researched. These investigations noted that NaCl does not generate a polished road surface in comparison with sand or quartz dust [12]. Furthermore, the value of ITS (Indirect Tensile Strength) after 50 freeze–thaw cycles for mixtures exposed to NaCl was greater than other deicing agents, even better than the reference series [13].

Some researchers [14,15] proposed the use of additives compounded principally by salt (sodium chloride or calcium chloride) and integrated as aggregate in the bituminous mixture in order to prevent the formation of ice on the roads. Using an additive similar to these, Liu et al. [16] conducted research to determine the ITS and Indirect Tensile Strength Ratio (ITSR) of a bituminous mixture with different fineness of an antifreeze additive and the results show a 7% increase in the values of ITSR using the finest additive compared with the reference.

The effect salt has on bituminous mixtures may not only be due to winter roads. Feng et al. [17] researched three types of mixtures with different compositions (AM, OGFC, and AC) subjected to freeze–thaw cycles while submerged in seawater. They concluded that the values of ITSR are lower for all the mixtures compared with the reference series, but the AC has values closer to the reference than the other two mixtures. Obika et al. [18] noted that solubility, salt crystallization, and crystal pressures are the determining factors in the damage mechanism for the bituminous mixture in hot climates.

Juli-Gándara et al. [19] collected the mechanical performance of an asphalt concrete and a porous asphalt (with two different binders) influenced by different interactions with salt. This influence of NaCl was examined by submerging specimens in salt water, adding NaCl as an additive into the bituminous mixture and immersing the aggregate in salt water before using it to manufacture the mixture. Their results show that the values of the ITS, ITSR, Wheel Tracking Test, and Cantabro Loss Particle Test are slightly affected by NaCl when the bituminous mixture is submerged in salt water. However, the mixtures that have salt as additive—even more in the case of the porous asphalt—have lower values of the ITS and Cantabro Loss Particle Test due to the fact that NaCl is softer than the aggregate. Furthermore, the aggregate–binder interface and the adhesiveness for bituminous mixtures in which its aggregate was immersed in salt water before manufacture are greatly affected.

However, the behavior of bituminous mixtures are not utterly defined without knowing its elastic and viscoelastic properties [20,21]. Tino [22] researched the effect of external agents, including salt as a deicing agent, on the viscoelastic behavior of bituminous mixtures. He concluded that the most negative effect for them is the combination of climate factors (principally, temperature and humidity), aggravated by the action of salt as a deicing agent. Vega-Zamanillo et al. [23] studied the impact of temperature changes and freeze–thaw cycles on the behavior of bituminous mixtures, including viscoelastic properties, submerged in salt water. They indicated that the most damaging process takes place when the mixture remains in contact with frozen water. They also noted that the specimens submerged in salt water maintain their mechanical properties better than those submerged in distilled water.

This research will attempt to define the elastic and viscoelastic properties through the values of the resilient modulus, dynamic modulus, and life fatigue of two bituminous mixtures—an asphalt concrete and a porous asphalt—when influenced by the presence of NaCl. This influence has been evaluated by three different methods: submerging specimens of bituminous mixture in salt water; introducing salt into the specimens as aggregate and immersing the aggregate in salt water; and drying it and manufacturing the bituminous mixture with it.

2. Materials and Methods

2.1. Materials

2.1.1. Binder

In this research, a bitumen commonly used in Spain (B 50/70) has been utilized. The characteristic values of this bitumen are as follows:

Frass Breaking Point (UNE-EN 12593:2015) [24] -9°C .

Softening Point (UNE-EN 1427:2015) [25] 47.2°C .

Penetration (UNE-EN 1426:2015) [26] (25°C ; 100 g, 5 s) 65.0 (0.1 mm).

2.1.2. Aggregate

All the specimens have been manufactured using an ophite with the following properties:

Specific Weight (UNE-EN 1097-6:2014) [27] 2.921 g/cm^3 .

Water Absorption (UNE-EN 1097-6:2014) [27] 1.0%.

Los Angeles Abrasion Test (UNE-EN 1097-2:2010) [28] 16.0%.

Flakiness Index (UNE-EN 933-3:2012) [29] 9.0%.

Limestone (specific weight 2.753 g/cm^3) has been used as mineral powder.

2.1.3. Bituminous Mixture

The two mixtures selected to compose this research were an AC-16 Surf B 50/70 D with a binder content of 5.00% and a PA-16 with a binder content of 4.21% (composition in Figure 1). Both are commonly used in Spain and appear in articles 542 and 543 of the Spanish Standard PG-3 [30]. AC-16 Surf B 50/70 D is one of the most common mixtures used on high mountain roads, and the kind most likely to have winter road problems. PA-16 is usually used on high-capacity highways, including highways around marine environments. All of the specimens have been manufactured in a laboratory using a mixer with planetary rotation and vertical shaft.

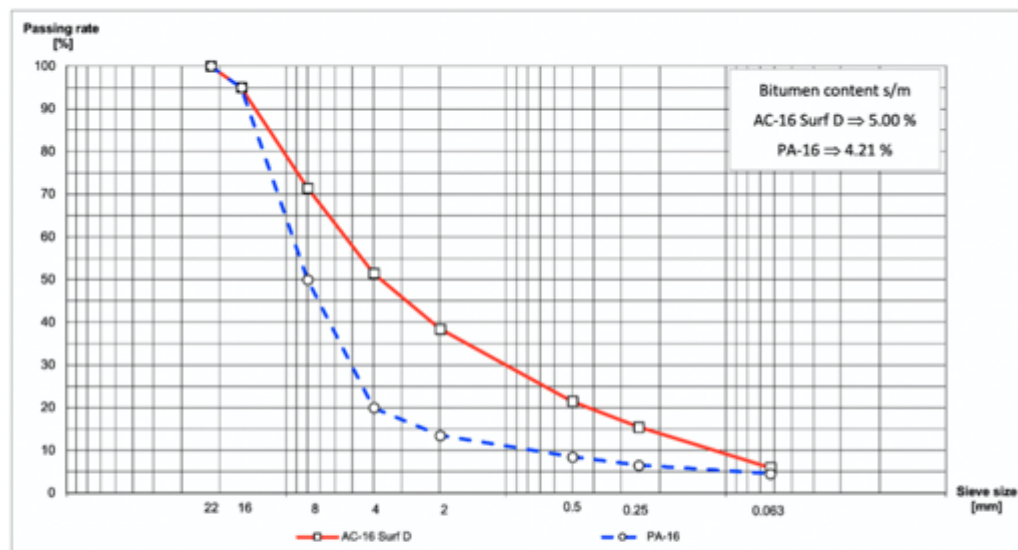


Figure 1. Particle size and asphalt content of bituminous mixture.

The variation in density and air void content (UNE-EN 12697-34:2013) [31] of all the different specimens is shown below:

- Asphalt concrete:
Density: 2.45–2.51 g/cm³.
Air void content: 6.0–8.4%.
- Porous asphalt:
Density: 2.17–2.22 g/cm³.
Air void content: 16.7–19.8%.

2.1.4. NaCl and Seawater

NaCl is the salt used in this research. Passing rate and density are shown in Figure 2.

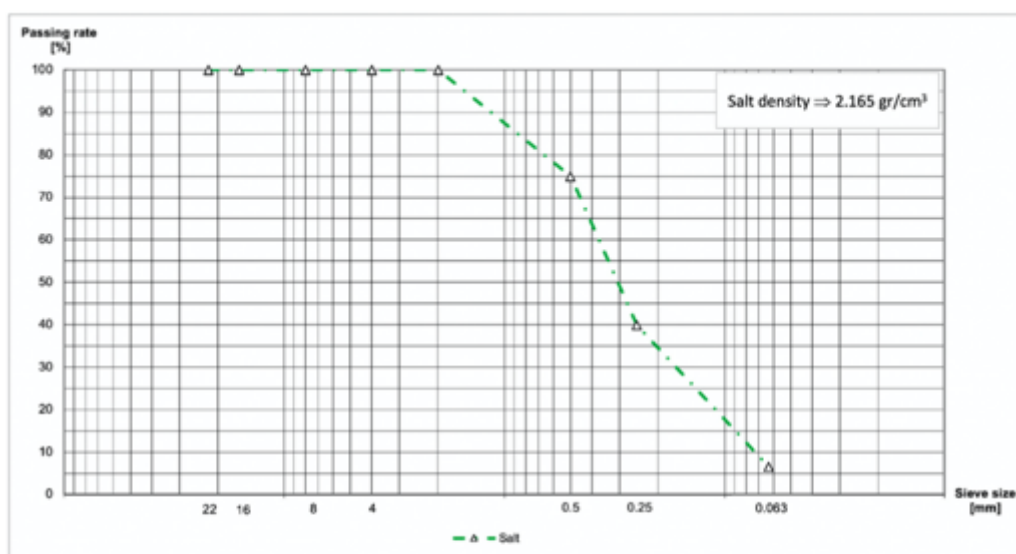


Figure 2. Passing rate and density of salt.

For one of the cases of specimens submerged in salt water, seawater from the Bay of Santander (Spain) was used. This seawater was provided by the Maritime Museum of the Cantabrian Sea with a salt concentration of 3.5% totally dissolved.

2.2. Methodology

Three different salt treatments were analyzed. Series A is for references.

2.2.1. Bituminous Mixture Immersed in Salt Water

This treatment is similar to the conditions of a bituminous mixture subjected to the spread of brine on a winter road or a road that is in close proximity to seawater. The specimens are immersed in three different saltwater concentrations:

- Series B1, 3.5% (seawater).
- Series B2, 5.0% amount of salt by weight of distilled water.
- Series B3, 10.0% amount of salt by weight of distilled water.

The time and temperature that the specimens remain submerged in salt water depend on the particular test.

2.2.2. NaCl Introduced as Aggregate into the Bituminous Mixture

By adding NaCl as aggregate (not a replacement of aggregate) into the specimens, this research attempts to simulate the use of an additive that is utilized to prevent the formation of ice on roads. Two different amounts of salt by weight of aggregate were used:

Series C1, 2%.

Series C2, 5%.

Salt was added at the same time as the aggregate when the bituminous mixture was mixed.

2.2.3. Bituminous Mixture Manufactured with an Aggregate Previously Saturated in Salt Water

Through this treatment, the research attempts to find out how the aggregate–binder interface is affected by the action of salt. The method that this investigation follows in order to saturate the aggregate with salt is to submerge all of the aggregate in salt water for 72 h at 20 °C (enough time to be totally saturated). Afterwards, the aggregate remained in the same container and was dried for 24 h at 60 °C. Lastly, the aggregate was transferred to a metal container, in which it reached the required mixing temperature.

The aggregate was submerged using two different amounts of salt by weight in distilled water:

Series D1, 2.0%,

Series D2, 3.5%.

2.3. Tests

2.3.1. Resilient Modulus Test

One of the most important features for typifying a material in civil engineering is its elastic properties, even in this case when the bituminous mixture has a viscous component. A bituminous mixture is a material that is subjected to dynamic load–unload cycles. The material strain under these cycles is divided into two parts: plastic strain; and elastic or recoverable strain. When the number of cycles increases, the accumulated plastic strain remains constant. At this moment, all of the strain is recoverable, and the behavior of the mixture is called resilient (Figure 3). This characteristic is also important in order to know its mechanical behavior. The test was conducted in accordance with the standard UNE-EN 12697-26: 2012 “Annex C” [32], applying indirect tension to cylindrical specimens. The dimensions of these cylindrical specimens are shown in the standard. Eight dry and another eight wet specimens were tested for each series. The wet specimens remained submerged in a water bath at 40 °C for three days before drying at 20 °C—the temperature at which the test is carried out.

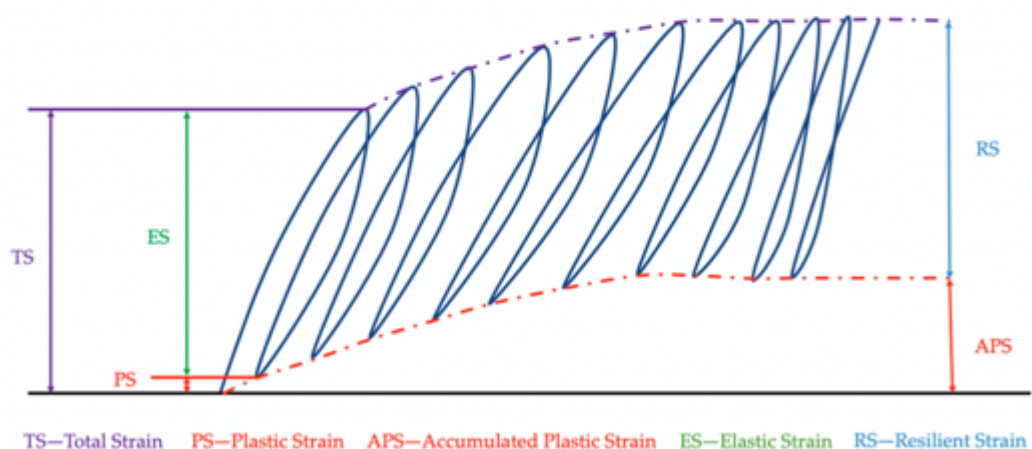


Figure 3. Resilient modulus.

2.3.2. Dynamic Modulus Test

As previously mentioned, bituminous mixture is not a perfectly elastic material, it has a viscous component. Due to this fact, the values of the dynamic modulus are of primary importance. This test follows the directive of the standard UNE-EN 12697-26: 2012 “Annex B” four-point bending test [32]. The testing temperature was 20 °C. The dynamic modulus test was carried out for one wet series of salt treatments, C and D of PA-16, because these series of porous asphalt are most susceptible to being affected by salt [19]. The wet specimens follow the same procedure as the wet specimens of resilient modulus. The dimensions of the beam used in this test appear in the standard. Eight specimens were tested from each selected series.

2.3.3. Fatigue Test

The fatigue test furnishes an idea of the durability of a bituminous mixture through cycles of dynamic load and unload. UNE-EN 12697-24: 2012 “Annex D” four-point bending test [33] provides the method to carry out the test. Test temperature, series, dimensions, number of specimens evaluated, and the procedure for wet specimens are also the same as in the dynamic modulus test.

3. Results

3.1. Resilient Modulus Test

The results generated in this test (Tables 1 and 2) provide an idea that salt has a scant impact on the resilient modulus when the action of the salt takes place after the manufacture of the bituminous mixture (B-Series), however, for the series in which the salt treatment takes place before the manufacture (C and D series), the modulus is altered.

Table 1. Resilient modulus.

	Series	Resilient Modulus (MPa)			
		AC-16 Surf D Dry	Wet	PA-16 Dry	Wet
Reference	A	5146	4710	1875	1864
Specimens immersed in salt water	B1	5146	4583	1875	1670
	B2	5146	4544	1875	1479
	B3	5146	4603	1875	2246
NaCl introduced as aggregate	C1	5215	4927	1936	1670
	C2	5470	5936	2289	1470
Aggregate previously saturated in salt water	D1	3873	4378	1813	1712
	D2	3258	3649	1774	569

Table 2. Resilient modulus. Standard deviation.

	Series	Standard Deviation (MPa)			
		AC-16 Surf D Dry	Wet	PA-16 Dry	Wet
Reference	A	378	320	208	168
Specimens immersed in salt water	B1	378	312	208	203
	B2	378	342	208	184
	B3	378	350	208	192
NaCl introduced as aggregate	C1	278	301	236	211
	C2	399	410	315	268
Aggregate previously saturated in salt water	D1	287	354	305	242
	D2	354	298	289	290

The specimens of B-Series, submerged in any saltwater concentration, for both types of mixtures as well as for dry and wet specimens, have values of resilient modulus similar to the reference series. The modulus has more variability only for wet specimens of porous asphalt.

Dry specimens of C-Series, for asphalt concrete and porous asphalt, reach values slightly higher of resilient modulus than those of A-Series. This may be due to the fact that the addition of salt forces the binder to blend with more aggregate, so the percentage of bitumen content is reduced. For wet specimens however, the two mixtures display different behavior. The values of resilient modulus of wet asphalt concrete specimens increase between 4% and 26%, reaching values higher than their analogous dry specimens (C2) for the same reason as in the dry specimens. Nevertheless, porous asphalt has a completely different behavior. Even though it is true that in this mixture the percentage of bitumen content is also reduced, there is another more decisive aspect; porous asphalt is more susceptible to the action of water, and this fact involves a decrease in the values of the modulus between 10% and 21%.

D-Series shows results of resilient modulus much lower than those of the reference series. On account of the fact that salt impregnates the aggregate, the aggregate–binder interface is critically damaged, losing all the adhesiveness; likewise, this is even stronger in porous asphalt when the mixture is submerged in water with the highest quantity of salt.

3.2. Dynamic Modulus Test

Figure 4 shows that wet reference specimens have a phase angle higher than dry reference specimens. So, submerging the mixture in water is the first factor in regard to lose elasticity.

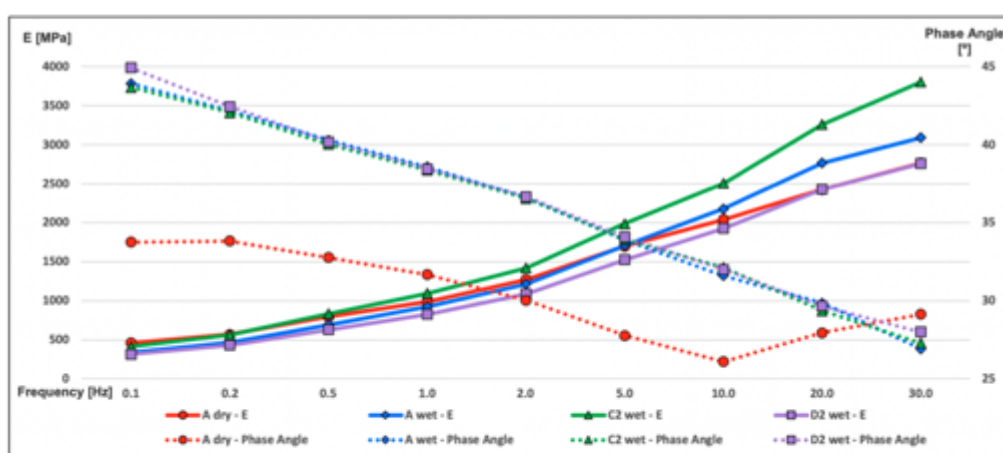


Figure 4. Dynamic modulus test.

Furthermore, the specimens in which salt was added as aggregate have values of the modulus higher than those of the reference series, reaching values even higher than the dry specimens of A-Series for frequencies beyond 0.5 Hz. In addition to the greater phase angle, this fact indicates that C-Series is more viscous than A-Series.

Just as the results of the resilient modulus, D-Series in this test has the lowest values of dynamic modulus for all of the frequency ranges. Parallel to this, the phase angle has higher values than the rest of series. These results corroborate the hypothesis that the aggregate–binder interface is damaged by this salt treatment.

The goodness-of-fit statistic is shown in Table 3 and the analysis of variance appears in Table 4.

Table 3. Goodness-of-fit statistic. Dynamic modulus.

R^2	0.971
Adjusted R^2	0.967

Table 4. Analysis of variance. Dynamic modulus.

Source	DF	Sum of Squares	Mean Squares	F	Pr > f
Model	5	31,629,381.51	6,325,876.30	203.63	<0.0001
Error	30	931,953.49	31,065.12	-	-
Corrected Total	35	32,561,335.00	-	-	-

Computed against model $Y = \text{Mean}(Y)$

3.3. Fatigue Test

The lines that connect the number of load cycles with the strain of the specimens, the fatigue lines (Figure 5), show that the dry reference series obtains a greater number of load cycles than the rest of series for all of the strain ranges. This result is due to the fact that the A dry series does not undergo any type of damage process. Nonetheless, in the same figure it could be observed that the rest of the analyzed series are very close, raising the A wet series a few more load cycles than C2 wet and D2 wet that are almost in the same line. Therefore, even though submerging specimens in water is the main damage process for the bituminous mixture, this process in combination with any salt treatment reduces the number of load cycles even more.

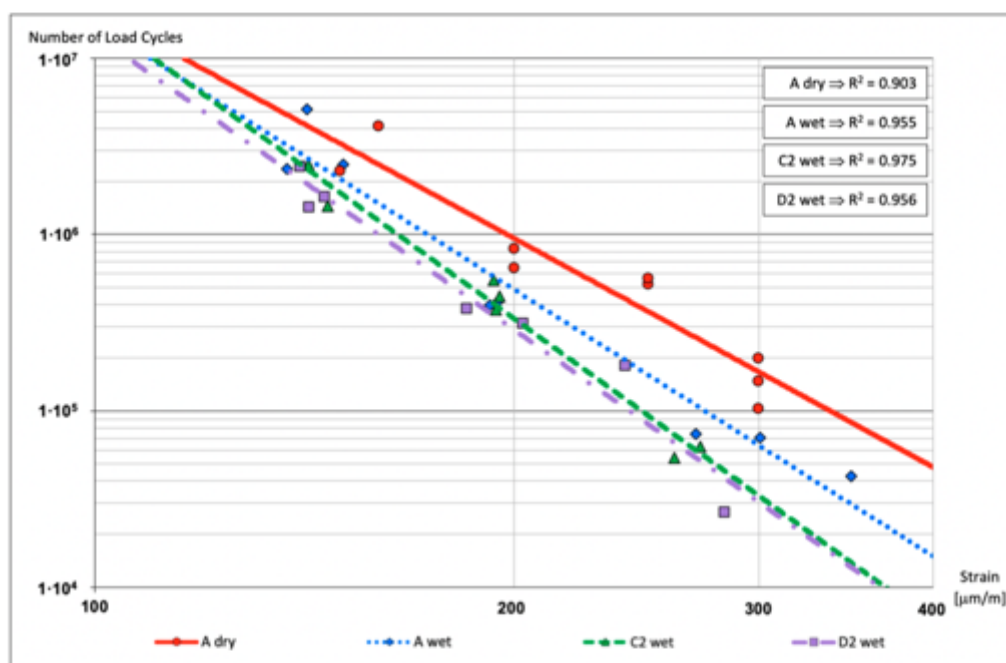


Figure 5. Fatigue test.

The statistical results are shown in Tables 5 and 6, goodness-of-fit statistic and the analysis of variance, respectively.

Table 5. Goodness-of-fit statistic. \log_{10} (Number of load cycles) - \log_{10} (Strain). Fatigue.

R^2	0.972
Adjusted R^2	0.967

Table 6. Analysis of variance. \log_{10} (Number of load cycles) - \log_{10} (Strain). Fatigue.

Source	DF	Sum of Squares	Mean Squares	F	Pr > f
Model	4	11.29	2.82	222.16	< 0.0001
Error	27	0.33	0.01	-	-
Corrected Total	31	11.62	-	-	-

Computed against model $Y = \text{Mean}(Y)$

4. Conclusions

Submerging porous asphalt in water is one of the main damage processes that causes loss of elasticity and durability. However, if salt is added as aggregate in porous asphalt, when the bituminous mixture is submerged, the viscosity increases for all frequencies and the durability decreases even more.

Adding salt as aggregate into the asphalt concrete increments its resilient modulus, even more for specimens that remain submerged, reaching, for the mixture with a 5% of salt added, a value 26% higher than the reference series. Furthermore, in dynamic modulus test, these specimens have values of the modulus higher than those of the reference series, reaching values even higher than the dry reference specimens for frequencies beyond 0.5 Hz.

Immersing specimens in salt water has a scant effect on its resilient modulus compared with submerging the mixture in distilled water. The action of the salt in this case takes place after the manufacture of the bituminous mixture and NaCl cannot damaged the aggregate–binder interface.

The most harmful effect that NaCl produces in the bituminous mixture is when it affects the aggregate–binder interface, losing all the adhesiveness. This is even more when the mixture is submerged in water. Consequently, the elastic and viscoelastic properties of the bituminous mixture are critically altered. For this reason, the treatment that introduces more damage to bituminous mixture is to use an aggregate previously saturated in salt water in the manufacture of the mixture.

Author Contributions: Conceptualization, L.J.-G., Á.V.-Z. and M.Á.C.-P.; methodology, L.J.-G.; software, L.J.-G. and E.T.-L.-Z.; validation, L.J.-G., Á.V.-Z. and M.Á.C.-P.; formal analysis, L.J.-G.; investigation, L.J.-G.; resources, L.J.-G.; data curation, L.J.-G. and E.T.-L.-Z.; writing—original draft preparation, L.J.-G.; writing—review and editing, L.J.-G., Á.V.-Z. and M.Á.C.-P.; supervision, L.J.-G., Á.V.-Z. and M.Á.C.-P. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript

Funding: This research received no external funding.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Muthumani, A.; Fay, L.; Akin, M.; Wang, S.; Gong, J.; Shi, X. Correlating lab and field tests for evaluation of deicing and anti-icing chemicals: A review of potential approaches. *Cold Reg. Sci. Technol.* **2013**, *97*, 21–32. [\[CrossRef\]](#)
2. García, L. Eficiencia en Vialidad Invernal. Materiales Empleados en los Trabajos para el Mantenimiento de la Vialidad Invernal. In Proceedings of the XII Jornadas de Conservación de Carreteras, Madrid, Spain, 10–11 November 2010.
3. Norrström, A.C. Metal mobility by de-icing salt from an infiltration trench for highway runoff. *Appl. Geochem.* **2005**, *20*, 1907–1919. [\[CrossRef\]](#)
4. Bäckström, M.; Karlsson, S.; Bäckman, L.; Folkesson, L.; Lind, B. Mobilisation of heavy metals by deicing salts in a roadside environment. *Water Res.* **2003**, *38*, 720–732. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)

5. Norrström, A.C.; Jacks, G. Concentration and fractionation of heavy metals in roadside soils receiving de-icing salts. *Sci. Total Environ.* **1998**, *218*, 161–174. [[CrossRef](#)]
6. Engelsen, C.J.; Wibetoe, G.; van der Sloot, H.A.; Lund, W.; Petkovic, G. Field site leaching from recycled concrete aggregates applied as sub-base material in road construction. *Sci. Total Environ.* **2012**, *427–428*, 86–97. [[CrossRef](#)]
7. Snodgrass, J.W.; Moore, J.; Lev, S.M.; Casey, R.E.; Ownby, D.R.; Flora, R.F.; Izzo, G. Influence of Modern Stormwater Management Practices on Transport of Road Salt to Surface Waters. *Environ. Sci. Technol.* **2017**, *51*, 4165–4172. [[CrossRef](#)]
8. Rivett, M.O.; Cuthbert, M.O.; Gamble, R.; Connon, L.E.; Pearson, A.; Shepley, M.G.; Davis, J. Highway deicing salt dynamic runoff to surface water and subsequent infiltration to groundwater during severe UK winters. *Sci. Total Environ.* **2016**, *565*, 324–338. [[CrossRef](#)]
9. Ikiz, N.; Galip, E. Computerized decision tree for anti-icing/pre-treatment applications as a result of laboratory and field testings. *Cold Reg. Sci. Technol.* **2016**, *126*, 90–108. [[CrossRef](#)]
10. Trenouth, W.R.; Gharabaghi, B.; Perera, N. Road salt application planning tool for winter de-icing operations. *J. Hydrol.* **2015**, *524*, 401–410. [[CrossRef](#)]
11. Klein-Paste, A.; Wählin, J. Wet pavement anti-icing—A physical mechanism. *Cold Reg. Sci. Technol.* **2013**, *96*, 1–7. [[CrossRef](#)]
12. Wang, D.; Xie, X.; Oeser, M.; Steinauer, B. Influence of the gritting material applied during the winter services on the asphalt surface performance. *Cold Reg. Sci. Technol.* **2015**, *112*, 39–44. [[CrossRef](#)]
13. Hassan, Y.; el Halim, A.O.A.; Razaqpur, A.G.; Bekheet, W.; Farha, M.H. Effects of Runway Deicers on Pavement Materials and Mixes: Comparison with Road Salt. *J. Transp. Eng.* **2012**, *128*, 385–391. [[CrossRef](#)]
14. Zheng, M.; Zhou, J.; Wu, S.; Yuan, H.; Meng, J. Evaluation of long-term performance of anti-icing asphalt pavement. *Constr. Build. Mater.* **2015**, *84*, 277–283. [[CrossRef](#)]
15. Giuliani, F.; Merusi, F.; Polacco, G.; Filippi, S.; Paci, M. Effectiveness of sodium chloride-based anti-icing filler in asphalt mixtures. *Constr. Build. Mater.* **2012**, *30*, 174–179. [[CrossRef](#)]
16. Liu, Z.; Xing, M.; Chen, S.; He, R.; Cong, P. Influence of the chloride-based anti-freeze filler on the properties of asphalt mixtures. *Constr. Build. Mater.* **2013**, *51*, 133–140. [[CrossRef](#)]
17. Feng, D.; Yi, J.; Wang, D.; Chen, L. Impact of salt and freeze–thaw cycles on performance of asphalt mixtures in coastal frozen region of China. *Cold Reg. Sci. Technol.* **2010**, *62*, 31–41. [[CrossRef](#)]
18. Obika, B.; Freer-Hewish, R.J.; Fookes, G.P. Soluble salt damage to thin bituminous road and runway surfaces. *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.* **1989**, *22*, 59–73. [[CrossRef](#)]
19. Juli-Gándara, L.; Vega-Zamanillo, Á.; Calzada-Pérez, M.Á. Sodium chloride effect in the mechanical properties of the bituminous mixtures. *Cold Reg. Sci. Technol.* **2019**, *164*, 102776. [[CrossRef](#)]
20. Schlosser, F.; Mikolaj, J.; Zatkalikova, V.; Sramek, J.; Durekova, D.; Remek, L. Deformation Properties and Fatigue of Bituminous Mixtures. *Adv. Mater. Sci. Eng.* **2013**, *2013*, 701764. [[CrossRef](#)]
21. Deepa, S.; Saravanan, U.; Krishnan, J.M. On measurement of dynamic modulus for bituminous mixtures. *Int. J. Pavement Eng.* **2019**, *20*, 1073–1089. [[CrossRef](#)]
22. Tino Ramos, R. Influencia de los Agentes Externos Sobre el Comportamiento Viscoelástico de las Mezclas Bituminosas para Firmes de Carreteras. Ph.D. Thesis, University of Salamanca, Salamanca, Spain, 2015.
23. Vega-Zamanillo, Á.; Juli-Gándara, L.; Calzada-Pérez, M.Á.; Teijón-López-Zuazo, E. Impact of Temperature Changes and Freeze-Thaw Cycles on the Behaviour of Asphalt Concrete Submerged in Water with Sodium Chloride. *Appl. Sci.* **2020**, *10*, 1241. [[CrossRef](#)]
24. UNE-EN 12593:2015. *Bitumen and Bituminous Binders. Determination of the Fraass Breaking Point*; UNE: Madrid, Spain, 2015.
25. UNE-EN 1427:2015. *Bitumen and Bituminous Binders. Determination of the Softening Point. Ring and Ball Method*; UNE: Madrid, Spain, 2015.
26. UNE-EN 1426:2015. *Bitumen and Bituminous Binders. Determination of Needle Penetration*; UNE: Madrid, Spain, 2015.
27. UNE-EN 1097-6:2014. *Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates—Part 6: Determination of Particle Density and Water Absorption*; UNE: Madrid, Spain, 2014.
28. UNE-EN 1097-2:2010. *Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates—Part 2: Methods for the Determination of Resistance to Fragmentation*; UNE: Madrid, Spain, 2010.

29. UNE-EN 933-3:2012. *Tests for Geometrical Properties of Aggregates—Part 3: Determination of Particle Shape—Flakiness Index*; UNE: Madrid, Spain, 2012.
30. Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3); 2017. Available online: <http://www.carreteros.org/normativa/pg3/pg3.htm> (accessed on 2 May 2020).
31. UNE-EN 12697-34:2013. *Bituminous Mixtures—Test Methods for Hot Asphalt—Part 34: Marshall Test*; UNE: Madrid, Spain, 2013.
32. UNE-EN 12697-26:2012. *Bituminous Mixtures—Test Methods for Hot Mix Asphalt—Part 26: Stiffness*; UNE: Madrid, Spain, 2012.
33. UNE-EN 12697-24:2013. *Bituminous Mixtures—Test Methods for Hot Mix Asphalt—Part 24: Resistance to Fatigue*; UNE: Madrid, Spain, 2013.



© 2020 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

5.3. ARTÍCULO 3

IMPACT OF TEMPERATURE CHANGES AND FREEZE—
THAW CYCLES ON THE BEHAVIOUR OF ASPHALT
CONCRETE SUBMERGED IN WATER WITH SODIUM
CHLORIDE

Ángel Vega-Zamanillo, Luis Juli-Gándara, Miguel Á.
Calzada-Pérez, Evelio Teijón-López-Zuazo.

Applied Sciences, 10, 1241, 2020.

DOI: 10.3390/app10041241




*applied
sciences*





Article

Impact of Temperature Changes and Freeze—Thaw Cycles on the Behaviour of Asphalt Concrete Submerged in Water with Sodium Chloride

Ángel Vega-Zamanillo ¹, Luis Juli-Gándara ^{1,*} , Miguel Ángel Calzada-Pérez ¹ and Evelio Teijón-López-Zuazo ²

¹ GCS Research Group, Civil Engineering School, Universidad de Cantabria, 39005 Santander, Spain; vegaa@unican.es (Á.V.-Z.); calzadam@unican.es (M.Á.C.-P.)

² Construction and Agronomy Department, University of Salamanca, 49022 Zamora, Spain; etejon@usal.es

* Correspondence: ljj59@alumnos.unican.es or luis_juli@hotmail.com

Received: 21 January 2020; Accepted: 9 February 2020; Published: 12 February 2020



Abstract: One of the main applications of salt in civil engineering is its use as a de-icing agent on roads in cold areas. The purpose of this research is to find out the mechanical behaviour of an asphalt concrete when it is subjected to temperature changes and freeze–thaw cycles. These temperature interactions have been carried out for dry specimens, specimens submerged in distilled water and specimens submerged in salt water (5% of sodium chloride, NaCl). An AC16 Surf D bituminous mixture was evaluated under three types of temperature interaction: three reference series remained at a controlled temperature of 20 °C, another three series were subjected to five freeze–thaw cycles and the last three series have been subjected to one year outside in Santander (Spain). The mechanical behaviour of the mixture was determined by Indirect Tensile Strength Test (ITS), Water Sensitivity Test (ITSR) and Wheel Tracking Test, Dynamic Modulus Test and Fatigue Tests. The results of the tests show that, although the temperature changes have a negative effect on the mechanical properties, salt water protects the aggregate–binder adhesive, maintains the mechanical strength, increases the number of load cycles for any strain range and reduces the time that the mixture is in contact with frozen water.

Keywords: salt; NaCl; asphalt concrete; freeze–thaw cycles; winter road

Highlights: Specimens of hot mix asphalt were evaluated under different temperature changes, including freeze–thaw cycles. Temperature changes have a harmful effect on the behaviour of the mixture, but the amount of time that the mixture is submerged in contact with salt water is the main mechanism of damage. Salt water protects the aggregate–binder adhesive, maintains the mechanical strength, increases the number of load cycles for any strain range and reduces the time that the mixture is in contact with frozen water.

1. Introduction

Currently, the use of sodium chloride (NaCl) is widespread in a large number of countries, as a de-icing agent on winter roads. The impact that salt has on the environment has been extensively studied; the melting salt leads to the mobilization of heavy metals such as lead, cadmium, copper and zinc [1–4], along with increased chlorides (Cl[−]) [5,6]. However, salt is still used, due to its low cost, versatility and physical properties [7,8]. These physical properties make their use propitious in temperatures up to −21 °C, but as García [7] indicated, from −5 °C, in order to be more effective, they can be used in combination with calcium chloride (CaCl₂).

Shi et al. [9] noted that the value of negative impacts on the environment and on vehicles must be taken into account when calculating the costs of de-icing agents, including NaCl. In this trend of reducing costs and negative impacts, Klein-Paste et al. [10] indicated that the amount of NaCl that is used in practice could be reduced by 40%, to prevent the pavement from being slippery, because the salt spread on the roads causes a weakening of the ice. Another aspect studied along the line of reducing the negative impact of NaCl is the creation of tools to decide more efficiently when salt should be applied to roads [11,12].

There are also studies on the behaviour of bituminous mixtures in contact with the different de-icing agents. Wang et al. [13] noted that, compared to other anti-icing agents, such as sand and quartz dust, salt does not produce a polished surface. Hassan et al. [14] indicated that the value of Indirect Tensile Strength (ITS) for asphalt mixtures exposed to salt after 25 freeze–thaw cycles is similar to other de-icing agents, such as potassium acetate, sodium formate or urea. However, after 50 cycles, the ITS result is even better for the mixtures exposed to salt than those submerged in distilled water.

Feng et al. [15] studied the impact of salt on the performance of bituminous mixtures when it remains submerged under seawater subjected to freeze–thaw cycles. They simulate this fact by adding salt to bitumen and subjecting various types of mixtures (AM-16, OGFC-19 and AC-16) to freeze–thaw cycles; their results show a decrease in the Water Sensitivity Test (ITSR), with results being lower in the case of the AC mixture.

Juli-Gándara et al. [16] investigated how NaCl influences the mechanical properties of three types of asphalt mixtures: a hot mix asphalt with conventional bitumen; and two porous mixtures, one manufactured with a conventional binder and another with a modified binder. The effect of the salt is analysed by three different processes: immersing the specimens in salt water; adding salt as aggregate into the mixture; and submerging the aggregate in water with a certain concentration of salt, drying it and then making the mixture with it. The results show that the hot mix asphalt is scarcely affected when it is submerged in salt water.

The effects of freeze–thaw cycles in the bituminous mixture are widely studied. Goh and You [17] used an image-processing technique to indicate that the removal of fine and coarse aggregates on the surface increases when the asphalt mixture undergoes more freeze–thaw cycles. Tarefder et al. [18] tested an AC mixture to ITS and Fatigue Test after 5, 10, 15 and 20 freeze–thaw cycles, and the results showed a reduction of 30.7% in the fatigue life and a small amount of reduction of ITSR after five cycles. Özgan and Serin [19] indicated through the void ratio (V_h), the void ratio filled with asphalt (V_f) and the void ratio inside mineral aggregate (VMA) parameters; the ultrasonic velocity test; and the Marshall Stability (MS) that the effect of the freeze–thaw cycles on the asphalt concrete is highly important, especially for the hot mix asphalt design. Islam and Tarefder [20], who investigated the stiffness and tensile strength degradation behaviour of asphalt concrete on long-term freeze–thaw samples in the laboratory, indicated that the flexural stiffness decreases with the number of freeze–thaw cycles, whereas the ITS does not change significantly with the number of freeze–thaw cycles. Teltayev et al. [21] investigated, in laboratory conditions, the effect of cyclic freezing and thawing on the characteristics of the neat bitumen and bitumens modified with different polymers, as well as stone mastic asphalt concretes. Their results of the SMA-20 Bit 100/130 show a 78% decrease in the value of ITS and a 270% increase in the Rut Depth (RD) after 50 freeze–thaw cycles.

Until now, no research has covered the results of mechanical behaviour such as mechanical strength, permanent deformations, dynamic modulus and fatigue life, when an asphalt concrete mixture is subjected to temperature changes, freeze–thaw cycles and the impact of salt. The purpose of this research is to fill this gap. The temperature interactions have been carried out for dry specimens, specimens submerged in distilled water and specimens submerged in salt water (NaCl).

2. Methodology

2.1. Materials

2.1.1. Aggregate

The aggregate used in this research is an ophite with the following properties (Table 1):

Table 1. Properties of aggregate.

Aggregate	Los Angeles Abrasion Test (%) (UNE-EN 1097-2:2010) [22]	Water Absorption (%) (UNE-EN 1097-6:2014) [23]	Flakiness Index (%) (UNE-EN 933-3:2012) [24]
Ophite	16.0	1.0	9.0

The filler (mineral powder) is limestone, with a specific weight of 2.753 g/cm³.

2.1.2. Binder

A conventional bitumen B 50/70, which is frequently used in Spain, was used. Table 2 shows the principal properties of the bitumen:

Table 2. Properties of bitumen.

Bitumen	Penetration (25 °C; 100 g, 5 s) (0.1 mm) (UNE-EN 1426:2015) [25]	Softening Point (°C) (UNE-EN 1427:2015) [26]	Frass Breaking Point (°C) (UNE-EN 12593:2015) [27]
B 50/70	65.0	47.2	−9

2.1.3. Mixture

An AC16 Surf B50/70 D mixture, which is frequently used on surface pavements in Spain, was studied. The composition is shown in Table 3. The density of the mixture, according to the Marshall Test (UNE-EN 12697-34:2013) [28], is 2.458 g/cm³.

Table 3. Composition of bituminous mixture.

Sieve size (mm)	Passing Rate (%)								Bitumen Content s/m (%)
	22	16	8	4	2	0.5	0.25	0.063	
AC16 Surf D	100.0	95.0	71.5	51.5	38.5	21.5	15.5	6.0	5.0

The manufacture of the AC16 Surf B 50/70 D is done at the SENOR S.A. asphalt plant.

2.1.4. Salt

The salt used for this work is NaCl. Table 4 indicates the particle size of salt. The specific weight of the salt used is 2.165 g/cm³.

Table 4. Particle size of salt.

Sieve Size (mm)	Passing Rate (%)							
	22	16	8	4	2	0.5	0.25	0.063
Salt	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	74.9	39.9	6.6

2.2. Experimental Plan

Nine different series have been evaluated. All the batches of bituminous mixture were manufactured at the same time. After this, the specimens were subjected to individual analysis (Table 5):

- Test Series A: remains at a constant temperature of 20 °C;
- Test Series B: subjected to five freeze–thaw cycles;
- Test Series C, subjected to one year outside storage;

whereby

- (A0) is dry specimens,
- (A1) is submerged in distilled water,
- (A2) is submerged in salt water,

in each case.

Table 5. Series description.

		Water Interaction		
		Dry	Submerged in Distilled Water	Submerged in Salt Water
Temperature interaction	Constant temperature at 20 °C	A0	A1	A2
	Five freeze–thaw cycles	B0	B1	B2
	One year outside storage	C0	C1	C2

The amount of salt by water weight in A2, B2 and C2 series is five percent (5.0%). For submerged series, the temperature and time that the specimens are submerged change according to the test requirements.

2.2.1. Temperature Interaction

Three different temperature interactions were analysed. The A-Series are for reference; the temperature remains constant at 20 °C.

Freeze–Thaw Cycles

The B-Series were subjected to five freeze–thaw cycles between 38 and −33 °C. These temperatures have been chosen because 38 °C is approximately ten degrees higher than the summer air temperature average in Santander (Spain), and −33 °C is ten degrees lower than the freezing point of water with 5.0% salt content.

The temperature was measured by introducing a thermo-sensor inside the specimens at the time of manufacturing the mixture (Figure 1). With these thermo-sensors, it is possible to determine the internal temperature of the specimens (logging interval one minute). Knowing this, the time of each freeze–thaw cycle is established so that both phases, hot and cold, have enough time to reach the defined temperatures. Each freeze–thaw cycle requires 48 h to be completed, 24 h for the hot time period and 24 h for the cold time period (Figure 2).



Figure 1. Thermo-sensor inside the specimens.

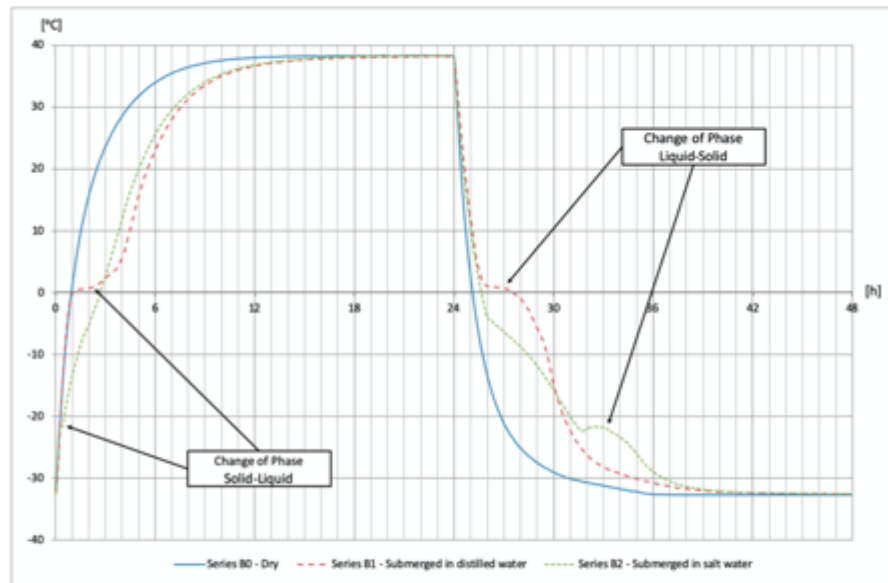


Figure 2. Freeze–thaw cycle.

The time that each submerged series remained in frozen water was defined by the steps of solid–liquid and liquid–solid changes. In the case of the B1 series, the time submerged in frozen water is 22 h, and in the B2 series, it is approximately 15 h.

Outside Storage

The outside storage series, the C-Series, remained outside in Santander (Spain) for one year, from 20 December 2016 to 20 December 2017, and was protected from precipitation. The maximum and minimum daily temperatures during this period were collected by the Spanish Meteorological Agency AEMET (Figure 3).

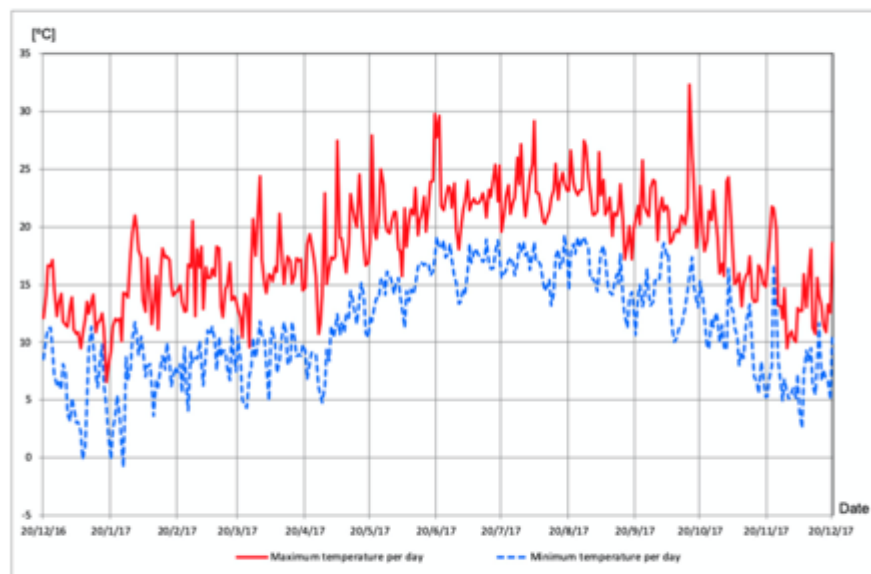


Figure 3. Maximum and minimum temperature per day in Santander for the year 2017.

2.3. Tests Programme

2.3.1. Indirect Tensile Strength (ITS) and Water Sensitivity Test (ITSR)

These tests have been done to determine the mechanical strength and how the aggregate-binder adhesive is influenced by the action of water. As established by Spanish Standard PG-3 [29], the test procedure was the “Method A” of the UNE-EN 12697-12: 2009 standard [30], with a compaction of the specimens by impact (UNE-EN 12697-30: 2013) [31], with 50 blows per side. Four dry specimens and another four wet specimens for each series were evaluated.

The dimensions of the specimens are 63.5 mm in height and 101.6 mm in diameter. This test is done for all specimens.

2.3.2. Wheel Tracking Test

This test has been carried out to determine the susceptibility of the specimen to deformation when a moving vertical load is applied. The test is done in accordance with the standard UNE-EN 12697-22: 2008 + A1 “Procedure B in air” [32], compacted by roller compactor (UNE-EN 12697-33: 2006 + A1) [33]. The limits established by PG-3 depending on the heavy traffic categories are 0.07 and 0.10 mm/10³ cycles of Wheel Track Slope (WTS).

The specimens are 410 mm long by 260 mm wide by 50 mm high. The Wheel Tracking Test is only done for the A-Series and C-Series. For these series, two specimens of each one were tested.

2.3.3. Dynamic Modulus Test

Since bituminous mixtures are a viscous material, this test was done to provide insight into the viscosity properties of the mixtures. The test was carried out as established by the standard UNE-EN 12697-26: 2012 “Annex B” four-point bending test [34]. Six specimens have been evaluated for each series, except for the C-Series, where eight specimens have been tested due to the long period that these specimens have been outdoors.

The specimens are 410 mm long by 60 mm wide by 60 mm high. The Dynamic Modulus Test was done for all specimens.

2.3.4. Fatigue Test

This test provides an estimate of durability of the bituminous mixture by load–unload cycles. The test procedure has been the UNE-EN 12697-24: 2013 “Annex D” four-point bending test [35]. The same number of specimens, as in the case of the Dynamic Modulus Test, was evaluated.

The dimensions of the specimens are the same as the ones of the Dynamic Modulus Test. The Fatigue Test is done for all specimens.

3. Results and Discussion

3.1. Indirect Tensile Strength (ITS) and Water Sensitivity Test (ITSR)

Table 6 shows the results of Indirect Tensile Strength and Water Sensitivity Test for all the series. The same as Hassan et al. [14] indicated, the values of ITS are similar or even better for mixtures exposed to salt than those submerged in distilled water.

The results obtained in the A-Series for ITS and ITSR are the regular ones for a hot mix asphalt. There are no noticeable differences between the series submerged in distilled water (A1) and the series submerged in salt water (A2). This result was expected due to the fact that the A-Series was not submitted to temperature changes.

In the series subjected to five freeze–thaw cycles (B-Series), although the result of ITS for dry specimens (B0) shows no significant difference when compared to the dry reference specimens (A0), that difference exists for the wet series. This variation is lower between specimens submerged in salt water (B2 and A2) and greater between specimens submerged in distilled water (B1 and A1). These

results show that the greatest damage to the hot mix asphalt is not the temperature changes but the amount of time that the mixture is submerged in frozen water. The B2 series obtained a value of ITRS, which is close to the limit established by PG-3 (Spanish Regulation) for surface layers (85%).

Table 6. Indirect tensile strength and water sensitivity.

	Series	AC16 Surf B 50/70 D		
		Maximum Load (kN)	ITSR (%)	
Constant temperature at 20 °C	A0	2340	–	–
	A1	–	2075	89
	A2	–	2053	88
Five Freeze–Thaw Cycles	B0	2385	–	–
	B1	–	1540	63
	B2	–	1975	83
One year outside storage	C0	2189	–	–
	C1	–	1418	65
	C2	–	1690	77

For the series subjected to a year outdoors (C-Series), the results of ITS for dry and submerged specimens are lower than the ones of the reference series (A-Series). However, in the case of submerged specimens (C1 and C2), especially for the series submerged in distilled water, the values of the ITS test are lower than in dry specimens (C0). This result is due to the fact that remaining submerged for a year is a more damaging process for the mixture than remaining dry for the same period.

3.2. Wheel Tracking Test

The values for the Wheel Track Slope and the Ruth Depth at 10,000 cycles (RD) for all the series are shown in Tables 7 and 8. The results obtained from these tests comply with the Spanish regulations for most climate zones and traffic.

Table 7. Wheel track slope.

	Series	AC16 Surf B 50/70 D
		WTS (mm/10 ³ Cycles)
Constant temperature at 20 °C	A0	0.08
	A1	0.07
	A2	0.05
One year outside storage	C0	0.06
	C1	0.04
	C2	0.08

Although the results for all series are similar, the series that have remained a year outdoors have obtained WTS and RD values lower than the reference series, except for the series whose specimens were submerged in salt water (C2). These low values (C0 and C1) can be due to the fact that, after one year in outside storage, the binder has become stiffer.

Table 8. Rut depth.

	Series	AC16 Surf B 50/70 D
		RD (mm)
Constant temperature at 20 °C	A0	3.2
	A1	3.6
	A2	2.4
One year outside storage	C0	2.6
	C1	2.1
	C2	3.0

3.3. Dynamic Modulus Test

As Table 9A,B indicate, the phase angles have no significant variation between the different series. Only in the case of those series which have been subjected to freeze–thaw cycles, the variation is slightly greater. This fact may be due to the larger temperature differences between the B-Series and the other series.

Table 9. Dynamic modulus test.

(A)										
AC16 Surf B 50/70 D										
Series	Frequency (Hz)									
	0.1		0.2		0.5		1.0		2.0	
	E (GPa)	Phase Angle (°)	E (GPa)	Phase Angle (°)	E (GPa)	Phase Angle (°)	E (GPa)	Phase Angle (°)	E (GPa)	Phase Angle (°)
Constant temperature at 20 °C	A0	2.4	32.8	2.9	30.5	3.7	27.0	4.4	24.9	5.2
	A1	2.2	33.8	2.7	31.2	3.5	27.5	4.1	25.1	4.9
	A2	2.1	34.7	2.6	32.1	3.5	28.4	4.2	26.1	5.0
Five Freeze–Thaw Cycles	B0	2.2	35.9	2.7	33.2	3.5	30.0	4.3	27.4	5.1
	B1	1.7	34.8	2.2	32.1	2.9	28.9	3.5	26.8	4.1
	B2	2.0	33.0	2.5	30.5	3.3	27.1	4.0	25.0	4.7
One year outside storage	C0	2.4	31.3	2.9	28.9	3.7	26.0	4.4	23.9	5.2
	C1	2.2	33.1	2.6	30.6	3.4	27.5	4.1	25.4	4.8
	C2	2.2	34.0	2.8	31.2	3.6	28.0	4.3	25.8	5.1

(B)										
AC16 Surf B 50/70 D										
Series	Frequency (Hz)									
	5.0		8.0		10.0		20.0		30.0	
	E (GPa)	Phase Angle (°)	E (GPa)	Phase Angle (°)	E (GPa)	Phase Angle (°)	E (GPa)	Phase Angle (°)	E (GPa)	Phase Angle (°)
Constant temperature at 20 °C	A0	6.2	20.3	6.9	19.0	7.1	18.5	8.1	17.0	8.9
	A1	6.0	20.7	6.6	19.2	6.9	18.6	7.9	17.6	8.7
	A2	6.1	21.3	6.7	20.0	7.0	19.3	8.0	17.8	8.9
Five Freeze–Thaw Cycles	B0	6.3	22.4	7.0	21.1	7.3	20.5	8.5	18.8	9.2
	B1	5.1	21.9	5.7	20.6	5.9	19.9	6.9	18.6	7.5
	B2	5.8	20.3	6.4	19.2	6.6	18.6	7.8	17.7	8.5
One year outside storage	C0	6.4	19.6	6.9	18.4	7.2	17.6	8.5	16.8	9.2
	C1	5.9	20.8	6.5	19.5	6.9	19.1	7.9	18.6	8.4
	C2	6.2	21.1	6.9	19.7	7.2	19.1	8.3	17.9	8.9

In the A-Series, very similar values were obtained for all the specimens. However, there exists a trend in which the dry series has higher modulus values and lower phase angles, due to the fact that it is more elastic than the two others.

However, for the series subjected to freeze–thaw cycles, a clear tendency appears; the dry specimens (B0) have greater modulus and phase angles for all of the test frequencies. In the case of the submerged series, B2 is more elastic than B1.

As in the case of the B-Series, for the C-Series, C0 has greater values of modulus, followed by C2 and finally by C1. However, in the case of the phase angles, the trend is different; the greatest angle is C2 and the lowest is C0. For the C-Series, the values of the modulus are greater, and the values of phase angles are lower compared with the A-Series and B-Series, and this indicates that the specimens have suffered a stiffening process.

In general, for all of the series and frequencies tested, the modulus values are greater for the dry series. This was expected due to the fact that submerging specimens in water is more harmful for the mixture than keeping them dry during any temperature interaction. Likewise, for all of the temperature interactions, there exists a trend which indicates that the series that are submerged in salt water have greater values of modulus than their corresponding pair submerged in distilled water, even more for the series subjected to freeze–thaw cycles. This trend supports the idea that the largest damage to the mixture that is submerged in water is the amount of time that it remains in frozen water, and the specimens that are submerged in salt water remain in frozen water for a shorter period of time.

3.4. Fatigue Test

The fatigue lines (Strain—Number of Load Cycles) obtained for all of the series are very similar, reaching notably high R^2 values; although, in the case of the C-Series, it is slightly lower. This may be due to the fact that the temperature interaction process is longer than in the A-Series and B-Series.

In the A-Series, for low values of strain, the submerged series, especially A1, obtain more load cycles than the dry specimens (Figure 4).

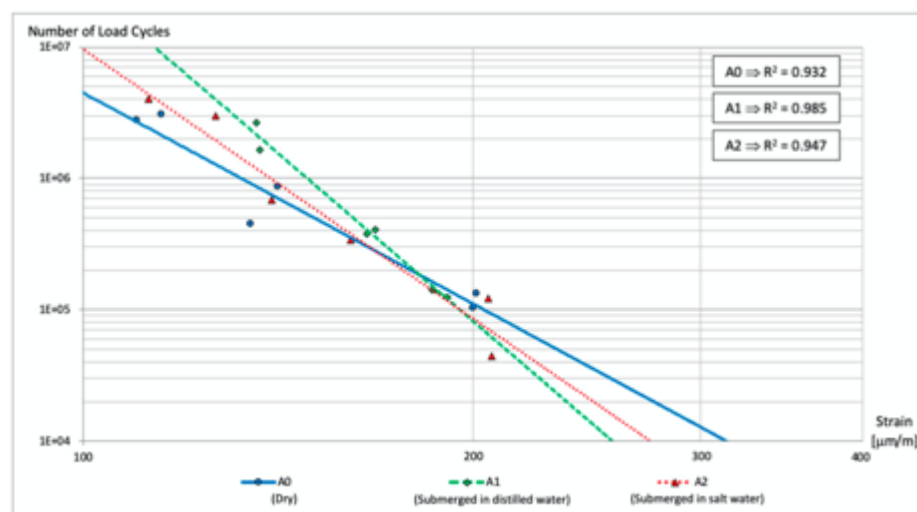


Figure 4. Fatigue test: specimens at constant temperature of 20 °C.

In the case of the series subjected to five freeze–thaw cycles (B-Series), the one that is submerged in salt water (B2) obtains more load cycles for any strain range than the other two series (Figure 5). This fact may be due to two main reasons. The first is that salt water offers a cushion effect on the temperature variations due to its thermal conductivity, which is smaller than that of distilled water [36]. The second is that the specimens of this series are in contact with frozen water for less time, which, as corroborated by the rest of the tests, is one of the most harmful effects for the mixture.

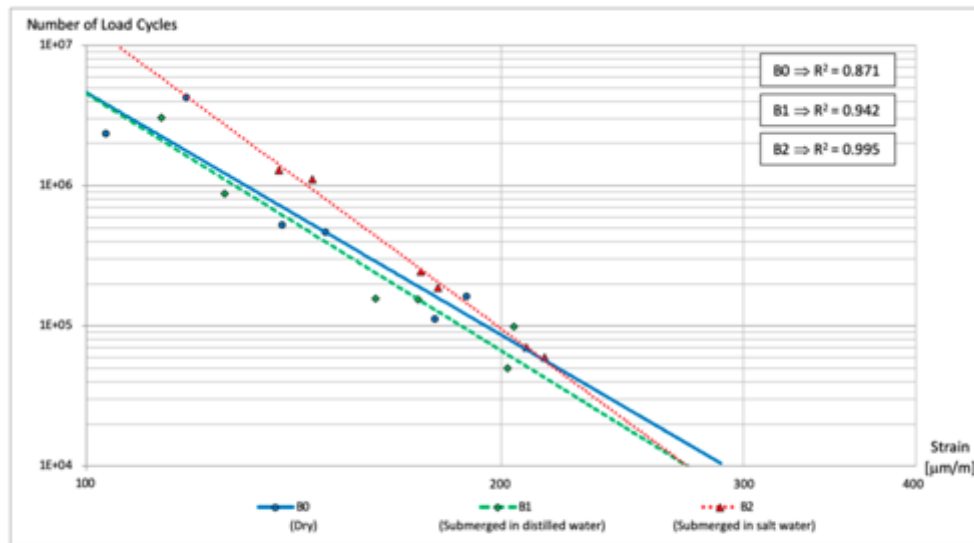


Figure 5. Fatigue test: specimens subjected to five freeze–thaw cycles.

The series that have been subjected to a year outdoors (C) obtain similar values for all specimens, being for C1 the number of load cycles slightly lower for high strain values (Figure 6).

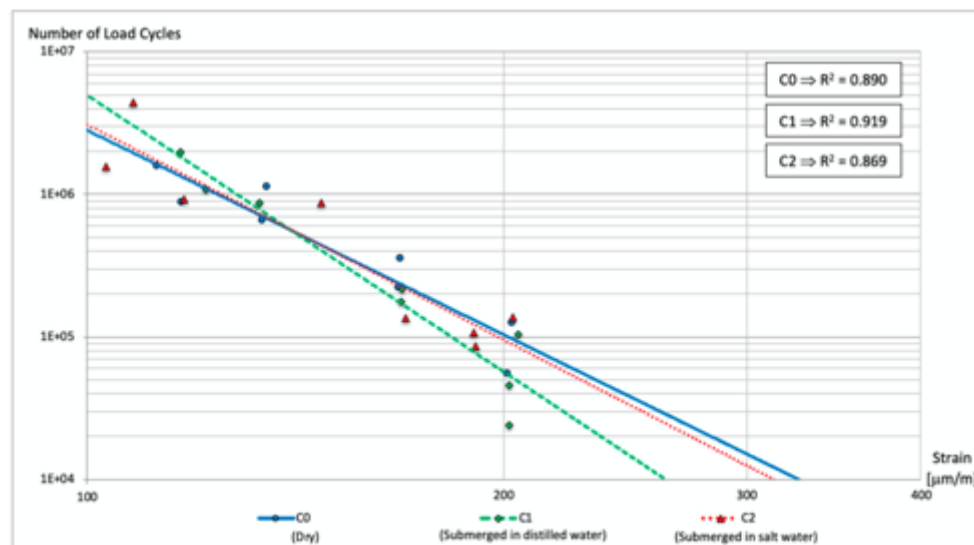


Figure 6. Fatigue test: specimens subjected to one of year outside storage.

4. Conclusions

Salt water reduces the time that the mixture is in contact with frozen water, which, as corroborated by the results, is one of the most harmful effects for the mixture.

When the bituminous mixture is subjected to freeze–thaw cycles, salt water has a protective effect on the specimens that remain submerged in it. The salt in the water protects the aggregate–binder adhesive, maintains the mechanical strength and increases the number of load cycles for any strain range.

The results of the Wheel Track Slope and the Rut Deep for reference mixtures and those that remained outdoors for one year are suitable for most climates zones and traffic.

The results of the Fatigue Test and Dynamic Modulus Test have no significant variation between the different series analysed.

The results show that, although the temperature has an injurious effect on the mechanical properties, the specimens submerged in salt water obtain better results than their analogs that are submerged in distilled water.

Author Contributions: Conceptualization, L.J.-G., Á.V.-Z. and M.Á.C.-P.; methodology, L.J.-G.; software, L.J.-G. and E.T.-L.-Z.; validation, L.J.-G., Á.V.-Z. and M.Á.C.-P.; formal analysis, L.J.-G.; investigation, L.J.-G.; resources, L.J.-G.; data curation, L.J.-G. and E.T.-L.-Z.; writing—original draft preparation, L.J.-G.; writing—review and editing, L.J.-G., Á.V.-Z. and M.Á.C.-P.; supervision, L.J.-G., Á.V.-Z. and M.Á.C.-P. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Bäckström, M.; Karlsson, S.; Bäckman, L.; Folkesson, L.; Lind, B. Mobilisation of heavy metals by deicing salts in a roadside environment. *Water Res.* **2003**, *38*, 720–732. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
2. Norrström, A.C. Metal mobility by de-icing salt from an infiltration trench for highway runoff. *Appl. Geochem.* **2005**, *20*, 1907–1919. [\[CrossRef\]](#)
3. Engelsen, C.J.; Wibetoe, G.; van der Sloot, H.A.; Lund, W.; Petkovic, G. Field site leaching from recycled concrete aggregates applied as sub-base material in road construction. *Sci. Total Environ.* **2012**, *427–428*, 86–97. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
4. Norrström, A.C.; Jacks, G. Concentration and fractionation of heavy metals in roadside soils receiving de-icing salts. *Sci. Total Environ.* **1998**, *218*, 161–174. [\[CrossRef\]](#)
5. Rivett, M.O.; Cuthbert, M.O.; Gamble, R.; Connon, L.E.; Pearson, A.; Shepley, M.G.; Davis, J. Highway deicing salt dynamic runoff to surface water and subsequent infiltration to groundwater during severe UK winters. *Sci. Total Environ.* **2016**, *565*, 324–338. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
6. Snodgrass, J.W.; Moore, J.; Lev, S.M.; Casey, R.E.; Ownby, D.R.; Flora, R.F.; Izzo, G. Influence of Modern Stormwater Management Practices on Transport of Road Salt to Surface Waters. *Environm. Sci. Technol.* **2017**, *51*, 4165–4172. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
7. García, L. Eficiencia en vialidad invernal. Materiales empleados en los trabajos para el mantenimiento de la vialidad invernal. In Proceedings of the XII Jornadas de Conservación de Carreteras, Madrid, Spain, 10–11 November 2010.
8. Muthumani, A.; Fay, L.; Akin, M.; Wang, S.; Gong, J.; Shi, X. Correlating lab and field tests for evaluation of deicing and anti-icing chemicals: A review of potential approaches. *Cold Reg. Sci. Technol.* **2013**, *97*, 21–32. [\[CrossRef\]](#)
9. Shi, X.; Veneziano, D.; Xie, N.; Gong, J. Use of chloride-based ice control products for sustainable winter maintenance: A balanced perspective. *Cold Reg. Sci. Technol.* **2013**, *86*, 104–112. [\[CrossRef\]](#)
10. Klein-Paste, A.; Wählin, J. Wet pavement anti-icing—A physical mechanism. *Cold Reg. Sci. Technol.* **2013**, *96*, 1–7. [\[CrossRef\]](#)
11. Ikiz, N.; Galip, E. Computerized decision tree for anti-icing/pretreatment applications as a result of laboratory and field testings. *Cold Reg. Sci. Technol.* **2016**, *126*, 90–108. [\[CrossRef\]](#)
12. Trenouth, W.R.; Gharabaghi, B.; Perera, N. Road salt application planning tool for winter de-icing operations. *J. Hydrol.* **2015**, *524*, 401–410. [\[CrossRef\]](#)
13. Wang, D.; Xie, X.; Oeser, M.; Steinauer, B. Influence of the gritting material applied during the winter services on the asphalt surface performance. *Cold Reg. Sci. Technol.* **2015**, *112*, 39–44. [\[CrossRef\]](#)
14. Hassan, Y.; El Halim, A.O.A.; Razaqpur, A.G.; Bekheet, W.; Farha, M.H. Effects of Runway Deicers on Pavement Materials and Mixes: Comparison with Road Salt. *J. Transp. Eng.* **2012**, *128*, 385–391. [\[CrossRef\]](#)
15. Feng, D.; Yi, J.; Wang, D.; Chen, L. Impact of salt and freeze–thaw cycles on performance of asphalt mixtures in coastal frozen region of China. *Cold Reg. Sci. Technol.* **2010**, *62*, 31–41. [\[CrossRef\]](#)
16. Juli-Gándara, L.; Vega-Zamanillo, Á.; Calzada-Pérez, M.Á. Sodium chloride effect in the mechanical properties of the bituminous mixtures. *Cold Reg. Sci. Technol.* **2019**, *164*, 102776. [\[CrossRef\]](#)

17. Goh, S.W.; You, Z. Evaluation of Hot-Mix Asphalt Distress under Rapid Freeze-Thaw Cycles using Image Processing Technique. In Proceedings of the 12th International Conference of Transportation Professionals (CICTP 2012), Beijing, China, 3–6 August 2012; pp. 3305–3315.
18. Tarefder, R.; Faisal, H.; Barlas, G. Freeze-thaw effects on fatigue LIFE of hot mix asphalt and creep stiffness of asphalt binder. *Cold Reg. Sci. Technol.* **2018**, *153*, 197–207. [CrossRef]
19. Özgan, E.; Serin, S. Investigation of certain engineering characteristics of asphalt concrete exposed to freeze-thaw cycles. *Cold Reg. Sci. Technol.* **2013**, *85*, 131–136. [CrossRef]
20. Islam, M.R.; Tarefder, R.A. Effects of Large Freeze-Thaw Cycles on Stiffness and Tensile Strength of Asphalt Concrete. *J. Cold Reg. Eng.* **2016**, *30*, 06014006. [CrossRef]
21. Teltayev, B.B.; Rossi, C.O.; Izmailova, G.G.; Amirbayev, E.D. Effect of Freeze Thaw Cycles on Mechanical Characteristics of Bitumen and Stone Mastic Asphalts. *Appl. Sci.* **2019**, *9*, 458. [CrossRef]
22. UNE-EN 1097-2:2010. *Tests for Mechanical and Physical Properties of aggregates—Part 2: Methods for the Determination of Resistance to Fragmentation*; UNE: Madrid, Spain, 2010.
23. UNE-EN 1097-6:2014. *Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates—Part 6: Determination of Particle Density and Water Absorption*; UNE: Madrid, Spain, 2014.
24. UNE-EN 933-3:2012. *Tests for Geometrical Properties of Aggregates—Part 3: Determination of Particle Shape—Flakiness Index*; UNE: Madrid, Spain, 2012.
25. UNE-EN 1426:2015. *Bitumen and Bituminous Binders. Determination of Needle Penetration*; UNE: Madrid, Spain, 2015.
26. UNE-EN 1427:2015. *Bitumen and Bituminous Binders. Determination of the Softening Point. Ring and BALL Method*; UNE: Madrid, Spain, 2015.
27. UNE-EN 12593:2015. *Bitumen and Bituminous Binders. Determination of the Fraass Breaking Point*; UNE: Madrid, Spain, 2015.
28. UNE-EN 12697-34:2013. *Bituminous Mixtures—Test Methods for Hot Asphalt—Part 34: Marshall Test*; UNE: Madrid, Spain, 2013.
29. Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3). 2017. Available online: <http://www.arquitectosdecadiz.com/wp-content/uploads/2017/12/PG3.pdf> (accessed on 20 January 2020).
30. UNE-EN 12697-12:2009. *Bituminous Mixtures—Test Methods for Hot Mix Asphalt—Part 12: Determination of the Water Sensitivity of Bituminous Specimens*; UNE: Madrid, Spain, 2009.
31. UNE-EN 12697-30:2013. *Bituminous Mixtures—Test Methods for Hot Mix Asphalt—Part 30: Specimen Preparation by Impact Compactor*; UNE: Madrid, Spain, 2013.
32. UNE-EN 12697-22:2008+A1:2008. *Bituminous Mixtures—Test Methods for Hot Mix Asphalt—Part 22: Wheel Tracking*; UNE: Madrid, Spain, 2008.
33. UNE-EN 12697-33:2006+A1:2007. *Bituminous Mixtures—Test Methods for Hot Mix Asphalt—Part 33: Specimen Prepared by Roller Compactor*; UNE: Madrid, Spain, 2007.
34. UNE-EN 12697-26:2012. *Bituminous Mixtures—Test Methods for Hot Mix Asphalt—Part 26: Stiffness*; UNE: Madrid, Spain, 2012.
35. UNE-EN 12697-24:2013. *Bituminous Mixtures—Test Methods for Hot Mix Asphalt—Part 24: Resistance to Fatigue*; UNE: Madrid, Spain, 2013.
36. Aleksandrov, A.A.; Dzhuraeva, E.V.; Utenkov, V.F. Thermal Conductivity of Sodium Chloride Aqueous Solutions. *Therm. Eng.* **2013**, *60*, 190–194. [CrossRef]



© 2020 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES

6.1. CONCLUSIONES GENERALES

El compendio de los tres artículos publicados genera las siguientes conclusiones globales acerca del efecto del cloruro sódico y la temperatura en las propiedades mecánicas, módulos y durabilidad de las mezclas bituminosas:

- El empleo de cloruro sódico como agente de deshielo produce un retraso en la formación de hielo sobre la superficie de las carreteras. El termo-sensor, introducido en el interior de las probetas, indica que este retardo producido por el cloruro sódico conlleva que las muestras estén un menor tiempo en contacto con el agua congelada; que, tal y como determinan los ensayos, es uno de los factores más perjudiciales en términos de comportamiento mecánico y durabilidad de las mezclas bituminosas.
- De manera general la sal afecta en mayor medida a las mezclas PA-16 que a las mezclas AC-16 Surf D. Este hecho puede deberse a que es la acción conjunta del agua y la sal la que deteriora la mezcla, y es precisamente en las mezclas porosas en las cuales el agua penetra más y por lo tanto, existe una mayor superficie de contacto.
- Si una mezcla bituminosa se sumerge en agua salada, con unos porcentajes de sal en el entorno de los que tiene el agua de mar, sus propiedades mecánicas apenas se ven afectadas.
- La resistencia mecánica de la sal es mucho menor que la del árido, por este motivo hay que tener precaución a la hora de añadir sal como árido a la mezcla, especialmente en las mezclas bituminosas porosas. Este hecho se ve reflejado en un peor comportamiento que la mezcla de referencia en los ensayos de sensibilidad al agua, cántabro húmedo y fatiga.
- Las mezclas bituminosas en las cuales el árido ha sido previamente saturado en agua salada son las que han tenido unos resultados peores en los ensayos de resistencia a tracción indirecta, sensibilidad al agua, rodadura y cántabro. En la envuelta, si las partículas de árido están impregnadas con sal, la interfaz árido-ligante se ve dañada de manera muy significativa, produciendo una disminución en la adhesividad de la mezcla bituminosa.

6.2. CONCLUSIONES ARTÍCULO 1

El primero de los artículos publicados, centrado en las propiedades mecánicas de mezclas bituminosas tipo *asphalt concrete* (AC) y tipo *porous asphalt* (PA) bajo el efecto de diferentes tratamientos de sal, deja las siguientes conclusiones:

- Los resultados indican que es la acción de la sal y el agua la que provoca los efectos más dañinos a la mezcla. Por este motivo, las mezclas PA, en las cuales el agua tiene un mayor acceso a las mismas, son más susceptibles de verse afectadas por la acción de ambos agentes. Sin embargo, en las mezclas AC, que son prácticamente impermeables al agua, el efecto de la sal y el agua es mínimo.
- Los valores obtenidos en el ensayo de sensibilidad al agua y en el ensayo cántabro (para las PA), señalan que el empleo de sal como árido tiene como principal inconveniente que su adhesividad con el betún es menor que la del resto de áridos.
- En las probetas en las cuales el árido ha sido saturado en agua salada, la sal crea una película alrededor de la superficie de las partículas de árido. Los resultados en los ensayos de resistencia a tracción indirecta, sensibilidad al agua, rodadura y cántabro indican que la capa de sal que envuelve a los áridos afecta severamente la interfaz árido-ligante, perdiendo la mezcla bituminosa gran parte de su adhesividad. Este hecho se ve claramente reflejado en la serie cuyos áridos estuvieron saturados en agua con la mayor concentración de sal (un 5 %), en donde pierde en el ensayo cántabro por vía húmeda 7,3 veces más peso de partículas que la serie de referencia y en el ensayo de resistencia a la tracción indirecta por vía húmeda, donde el valor de la carga máxima se reduce en un 58 % con respecto al valor obtenido en la muestra de referencia.
- En los tres métodos de influencia de la sal estudiados, la sal afecta en mayor medida a la mezcla PA-16 cuando el betún empleado es el convencional (50/70) que cuando el betún utilizado en su fabricación es el modificado (PMB 45/80-65).

6.3. CONCLUSIONES ARTÍCULO 2

La segunda de las publicaciones, enfocada en cómo varían los módulos resilientes, dinámicos y la durabilidad de los tipos de mezcla AC y PA en función del tratamiento de sal al que están sometidos, alcanza las siguientes conclusiones:

- Sumergir probetas en agua con sal tiene escaso efecto en su módulo resiliente comparado con sumergirlas en agua destilada. La acción de la sal en este caso tiene lugar después de la fabricación de la mezcla bituminosa y el cloruro sódico no daña la interfaz árido-ligante.
- Añadir sal como árido dentro de una mezcla bituminosa tipo AC incrementa su módulo resiliente, aún más cuando las probetas permanecen sumergidas, alcanzando, en la mezcla con mayor cantidad de sal añadida (5 % en función del peso de árido), un valor un 26 % mayor que la mezcla de referencia.
- Al igual que en la mezcla cerrada, añadir sal como árido a la mezcla PA conlleva un aumento en el módulo resiliente si la mezcla permanece seca. Sin embargo si la mezcla porosa permanece sumergida, el módulo resiliente y la durabilidad disminuyen, mientras que los valores del ángulo de fase y módulo dinámico se incrementan con respecto a los de la mezcla de referencia seca en prácticamente la totalidad del rango de frecuencias analizado (0,1 - 30,0 Hz).
- Cuando el árido empleado en la fabricación de la mezcla está previamente saturado en agua salada se producen las mayores alteraciones en el módulo resiliente y dinámico, así como en la durabilidad de la mezcla bituminosa. Esto es debido a que el efecto más perjudicial que genera la sal en las mezclas se produce cuando la sal afecta la interfaz árido-ligante, lo cual conlleva una pérdida muy significativa de la adhesividad. Este efecto se ve incrementado cuando la mezcla bituminosa permanece sumergida en agua.

6.4. CONCLUSIONES ARTÍCULO 3

El tercer artículo se adentra en cómo las variaciones de temperatura, incluidos ciclos de hielo-deshielo, influyen en una mezcla bituminosa AC en función de que las probetas permanezcan secas, sumergidas en agua destilada o sumergidas en agua con sal. Las conclusiones obtenidas se exponen a continuación:

- Los resultados obtenidos indican que la sal tiene un efecto protector sobre las probetas de mezcla bituminosa que permanecen sumergidas en el agua salada, ya que, cuanto mayor es el tiempo que está la mezcla en contacto con agua congelada, mayor es el descenso en los valores de resistencia a la tracción indirecta, módulo dinámico y número de ciclos de carga para cualquier rango de deformaciones.
- Los resultados de la pendiente de deformación en pista y la profundidad de la rodera, para la mezcla de referencia y para aquellas que permanecieron en la intemperie un año, cumplen con los requerimientos para la mayoría de zonas térmicas estivales y categorías de tráfico pesado según establecen las prescripciones vigentes.
- En todos los tratamientos térmicos estudiados, si la mezcla bituminosa permanece seca, los cambios de temperatura apenas tienen efecto sobre sus propiedades mecánicas. Sin embargo, cuando las probetas permanecen sumergidas, se aprecia una disminución en los valores de resistencia a la tracción indirecta, módulo dinámico y durabilidad. Esta disminución es menor en las probetas sumergidas en agua con un 10 % de sal que en aquellas sumergidas en agua destilada.

CAPÍTULO 7: FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Los resultados, comentarios y conclusiones de esta Tesis Doctoral podrían continuarse y completarse profundizando en las siguientes líneas de investigación:

- Debido al avance producido en el conocimiento sobre mezclas bituminosas con diferentes granulometrías, mezclas bituminosas discontinuas en caliente (BBTM) o Stone Mastic Asphalt (SMA) entre otras, los organismos competentes en materia de transporte por carretera cada vez son más proclives a aceptarlas. Por este motivo, y debido a que los resultados de la Tesis Doctoral muestran diferente tipo de afección de la sal en función del tipo de mezcla bituminosa empleada, sería interesante ampliar el tipo de mezclas estudiadas, no sólo a las cerradas (AC) y porosas (PA), sino también a mezclas del tipo BBTM o SMA.
- El desarrollo de betunes que posibiliten la obtención de mezclas bituminosas que, no sólo dispongan de unas mejores prestaciones frente al incremento de tráfico y las mayores exigencias que éste requiere, sino que también deriven en unos menores costes de mantenimiento de las infraestructuras viarias, está a la orden del día entre las empresas del sector. Los valores obtenidos en los ensayos realizados en el transcurso de esta Tesis Doctoral indican que la sal afecta a la adhesividad árido-ligante, debido a esto, estudiar cómo la sal interacciona con mezclas bituminosas que estén fabricadas con distintos tipos de betún modificado completaría los resultados alcanzados en esta tesis.
- Del mismo modo que ocurre con los betunes, en la actualidad se emplean diversos tipos de áridos en la fabricación de mezclas bituminosas. Como se ha indicado anteriormente, los resultados de esta Tesis Doctoral indican que la adhesividad árido-ligante se ve afectada por la presencia de sal. Debido a este hecho, el empleo de diferentes tipos de árido en la fabricación de la mezcla bituminosa colaboraría a caracterizar mejor cómo es la afección que tiene la sal en las mezclas bituminosas.
- En los últimos años el avance de la tecnología ha permitido dar un paso más en la línea de conocer las propiedades de uno de los componentes fundamentales de las mezclas bituminosas, el betún. Hoy en día los atributos del betún como aglutinante pueden analizarse a través de un reómetro. El empleo del reómetro abre un camino apropiado para profundizar en el conocimiento de las propiedades reológicas del betún tras los diferentes tratamientos con sal.

CAPÍTULO 8:

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aleksandrov, A. A.; Dzhuraeva, E. V.; Utenkov, V. F. Thermal Conductivity of Sodium Chloride Aqueous Solutions, *Thermal Engineering* 60(3) (2013) 190-194.
2. Asenjo, J.; Basurto, M. Á.; Coiradas, J.; Fernández, L.; Fonseca, J.; García, G; González, M.; Martín, Ó.; Núñez, Á.; Palacios, J.; Romera, F.; Sanz, F.; Vidal, J. Monografía. Las operaciones de conservación en vialidad invernal. Asociación de Empresas Conservación y Explotación de Infraestructuras (Acex), Madrid, 2017.
3. Azcue, L. Eficiencia en vialidad invernal. XII Jornadas de Conservación de Carreteras (2010).
4. Bäckström, M.; Karlsson, S.; Bäckman, L.; Folkesson, L.; Lind, B. Mobilisation of heavy metals by deicing salts in a roadside environment, *Water Research* 38 (2003) 720-732.
5. Castro, C. Varios países cuestionan la sal "quitanieves" por su daño ambiental (2009). Obtenido el 22 de mayo de 2020, de https://elpais.com/diario/2009/01/16/sociedad/1232060405_850215.html
6. Costa, A. Patologías de los Pavimentos. Asfalto y Pavimentación. 29 (8) (2018) 33-39.
7. Costa, A. Patologías de los Pavimentos. Asfalto y Pavimentación. 30 (8) (2018) 33-40.
8. Deepa, S.; Saravanan, U.; Krishnan, J. M. On measurement of dynamic modulus for bituminous mixtures, *International Journal of Pavement Engineering* 20 (2017) 1073–1089.
9. Del Pozo, J., Albareda, J. Microaglomerados en la vialidad invernal, *Carreteras* 198 (2014) 46-55.
10. Engelsen, C. J.; Wibetoe, G.; Van der Sloot, H. A.; Lund, W.; Petkovic, G. Field site leaching from recycled concrete aggregates applied as sub-base material in road construction, *Science of the Total Environment* 427-428 (2012) 86-97.
11. Feng, D.; Yi, J.; Wang, D.; Chen, L. Impact of salt and freeze–thaw cycles on performance of asphalt mixtures in coastal frozen region of China, *Cold Regions Science and Technology* 62 (2010) 31-41.
12. Fonnesbech, J. K. SOBO20 measurements on Motorway A-2 Madrid (2009).
13. García, L. Eficiencia en vialidad invernal. Materiales empleados en los trabajos para el mantenimiento de la vialidad invernal, XII Jornadas de Conservación de Carreteras (2010).

14. Giganto, T. Fomento estima que el arreglo de la N-360 costará 7 millones (2018). Obtenido el 12 de junio de 2020, de <https://www.lanuevacronica.com/fomento-estima-que-el-arreglo-de-la-n-630-costara-7-millones>
15. Giuliani, F.; Merusi, F.; Polacco, G.; Filippi, S.; Paci, M. Effectiveness of sodium chloride-based anti-icing filler in asphalt mixtures, *Construction and Building Materials* 30 (2012) 174–179.
16. Goh, S. W.; You, Z. Evaluation of Hot-Mix Asphalt Distress under Rapid Freeze-Thaw Cycles using Image Processing Technique, *Proc., 12th COTA International Conference of Transparent Professionals* (2012) 3305-3315.
17. Hassan, Y.; Abd El Halim, A. O.; Razaqpur, A. G.; Bekheet, W.; Farha, M. H. Effects of Runway Deicers on Pavement Materials and Mixes: Comparison with Road Salt, *Journal of transportation Engineering* 128 (4) (2012) 385-391.
18. Identificación de Fallas en Pavimentos y Técnicas de Reparación (Catálogo de fallas). Departamento de Administración y Evaluación de Pavimentos del Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones (M.O.P.C.) de la Republica Dominicana (1990).
19. Ikiz, N.; Galip, E. Computerized decision tree for anti-icing/pretreatment applications as a result of laboratory and field testings, *Cold Regions Science and Technology* 126 (2016) 90-108.
20. Islam, M. R.; Tarefder, R. A. Effects of Large Freeze-Thaw Cycles on Stiffness and Tensile Strength of Asphalt Concrete, *Journal of Cold Regions Engineering* 30 (2016) 06014006.
21. Klein-Paste A.; Wåhlin J. Wet pavement anti-icing — A physical mechanism, *Cold Regions Science and Technology* 96 (2013) 1-7.
22. Kraemer, C.; Pardillo, J. M.; Rocci, S.; Romana, M. G.; Sánchez Blanco, V.; Del Val, M. Á. Ingeniería de Carreteras. Volumen II. McGraw-Hill, Madrid, 2004.
23. Liu, Z.; Xing, M.; Chen, S.; He, R.; Cong, P. Influence of the chloride-based anti-freeze filler on the properties of asphalt mixtures, *Construction and Building Materials* 51 (2013) 133–140.
24. Lysbakken, K. R.; Lalagüe, A. Accuracy of SOBO-20 in the measurement of salt on winter pavements. *TRB 2013 Annual Meeting* (2012).

25. Muthumani, A.; Fay, L.; Akin, M.; Wang, S.; Gong, J.; Shi, X. Correlating lab and field tests for evaluation of deicing and anti-icing chemicals: A review of potential approaches, *Cold Regions Science and Technology* 97 (2013) 21-32.
26. NLT-155/63. Método para la determinación del peso específico del filler.
27. NLT-176/74. Densidad aparente del polvo mineral en tolueno.
28. NLT-177/94. Huecos del filler compactado en seco.
29. NLT-362/92. Efecto del agua sobre la cohesión de las mezclas bituminosas de granulometría abierta, mediante el ensayo cántabro de pérdida por desgaste.
30. Norrström, A. C. Metal mobility by de-icing salt from an infiltration trench for highway runoff, *Applied Geochemistry* 20 (2005) 1907-1919.
31. Norrström, A. C.; Jacks G. Concentration and fractionation of heavy metals in roadside soils receiving de-icing salts, *The Science of the Total Environment* 218 (1998) 161-174.
32. Obika, B.; Freer-Hewish, R. J.; Fookes, G. P. Soluble salt damage to thin bituminous road and runway surfaces, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 22 (1989) 59-73.
33. Özgan, E.; Serin, S. Investigation of certain engineering characteristics of asphalt concrete exposed to freeze-thaw cycles, *Cold Regions Science and Technology* 85 (2013) 131-136.
34. Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3).
35. Rivett, M. O.; Cuthbert, M. O.; Gamble, R.; Connon, L. E.; Pearson, A.; Shepley, M. G.; Davis, J. Highway deicing salt dynamic runoff to surface water and subsequent infiltration to groundwater during severe UK winters, *Science of the Total Environment* 565 (2016) 324-338.
36. Schlosser, F.; Mikolaj, J.; Zatkalikova, V.; Sramek, J.; Durekova, D.; Remek, L. Deformation Properties and Fatigue of Bituminous Mixtures, *Advance in Materials Science and Engineering*. 2013 (2013) 701764.
37. Shi, X.; Veneziano, D.; Xie, N.; Gong, J. Use of chloride-based ice control products for sustainable winter maintenance: A balanced perspective, *Cold Regions Science and Technology* 86 (2013) 104-112.

38. Snodgrass, J. W.; Moore, J.; Lev, S. M.; Casey, R. E.; Ownby, D. R.; Flora, R. F.; Izzo, G. Influence of Modern Stormwater Management Practices on Transport of Road Salt to Surface Waters, *Environmental Science & Technology* 51(8) (2017) 4165-4172.
39. Tarefder, R.; Faisal, H.; Barlas, G. Freeze-thaw effects on fatigue LIFE of hot mix asphalt and creep stiffness of asphalt binder, *Cold Regions Science and Technology* 153 (2018) 197-207.
40. Teltayev, B. B.; Rossi, C. O.; Izmailova, G. G.; Amirbayev, E. D. Effect of Freeze Thaw Cycles on Mechanical Characteristics of Bitumen and Stone Mastic Asphalts, *Applied Sciences* 9 (2019) 458.
41. Tino Ramos, R. Influencia de los Agentes Externos Sobre el Comportamiento Viscoelasticoplástico de las Mezclas Bituminosas para Firmes de Carreteras, Ph.D. Thesis, University of Salamanca, Salamanca Spain (2015).
42. Trenouth, W. R.; Gharabaghi, B.; Perera, N. Road salt application planning tool for winter de-icing operations, *Journal of Hydrology* 524 (2015) 401-410.
43. UNE-EN 1097-2:2010. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación.
44. UNE-EN 1097-6:2014. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua.
45. UNE-EN 1097-8:2010. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 8: Determinación del coeficiente de pulimento acelerado.
46. UNE-EN 12591:2009. Betunes y ligantes bituminosos. Especificaciones de betunes para pavimentación.
47. UNE-EN 12593:2015. Betunes y ligantes bituminosos. Determinación del punto de fragilidad Fraass.
48. UNE-EN 12697-12:2009. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 12: Determinación de la sensibilidad al agua de las probetas de mezcla bituminosa.

49. UNE-EN 12697-17:2006+A1:2007. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 17: Pérdida de partículas de una probeta de mezcla bituminosa drenante.
50. UNE-EN 12697-22:2008+A1:2008. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 22: Ensayo de rodadura.
51. UNE-EN 12697-23:2004. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 23: Determinación de la resistencia a la tracción indirecta de probetas bituminosas.
52. UNE-EN 12697-24:2013. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 24: Resistencia a la fatiga.
53. UNE-EN 12697-26:2012. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 26: Rigidez.
54. UNE-EN 12697-30:2013. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 30: Preparación de probetas mediante compactador de impactos.
55. UNE-EN 12697-33:2006. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezcla bituminosa en caliente. Parte 33: Elaboración de probetas con compactador de placa.
56. UNE-EN 12697-34:2013. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 34: Ensayo Marshall.
57. UNE-EN 12697-35:2006. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 35: Mezclado en laboratorio.
58. UNE-EN 12697-5:2010. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezcla bituminosa en caliente. Parte 5: Determinación de la densidad máxima.
59. UNE-EN 12697-6:2012. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 6: Determinación de la densidad aparente de probetas bituminosas.
60. UNE-EN 12697-8:2003. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezcla bituminosa en caliente. Parte 8: Determinación del contenido de huecos en las probetas bituminosas.

61. UNE-EN 13043:2003. Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, aeropuertos y otras zonas pavimentadas.
62. UNE-EN 1426:2015. Betunes y ligantes bituminosos. Determinación de la penetración con aguja.
63. UNE-EN 1427:2015. Betunes y ligantes bituminosos. Determinación del punto de reblandecimiento. Método del anillo y bola.
64. UNE-EN 933-1:2012. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado.
65. UNE-EN 933-2:1996. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas.
66. UNE-EN 933-3:2012. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 3: Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas.
67. UNE-EN 933-5:1999. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 5: Determinación del porcentaje de caras de fractura de las partículas de árido grueso.
68. UNE-EN 933-8:2012+A1:2015. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena.
69. UNE-EN 933-9:2010+A1:2013. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 9: Evaluación de los finos. Ensayo de azul de metileno.
70. Valenzuela, A. ¿Por qué se echa sal en las calles cuando nieva? (2012). Obtenido el 22 de mayo de 2020, de <https://www.rtve.es/noticias/20120203/se-echa-sal-calles-cuando-nieva/495187.shtml>
71. Vega, Á; Calzada, M.Á. Apuntes de clase de Caminos. Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, Plan 99. Universidad de Cantabria (2012).
72. Wang, D.; Xie, X.; Oeser, M.; Steinauer, B. Influence of the gritting material applied during the winter services on the asphalt surface performance, Cold Regions Science and Technology 112 (2015) 39-44.

73. Zheng, M.; Zhou, J.; Wu, S.; Yuan, H.; Meng, J. Evaluation of long-term performance of anti-icing asphalt pavement, *Construction and Building Materials* 84 (2015) 277–283.